

电机学

直流电机的基本原理和电磁关系

东南大学电气工程学院

黄允凯



东南大学
电气工程学院



1

直流电机的基本结构

2

直流电枢绕组

3

直流电机的磁场和电枢反应

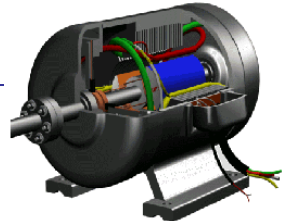
4

电枢绕组的感应电势和电压、功率平衡方程式

5

电枢绕组的电磁转矩和转矩平衡方程式





用途： 直流发电机把机械能转化为电能；
直流电动机把电能转化为机械能。

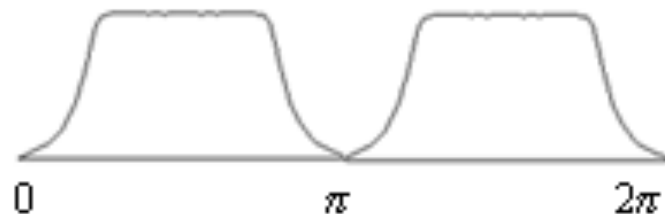
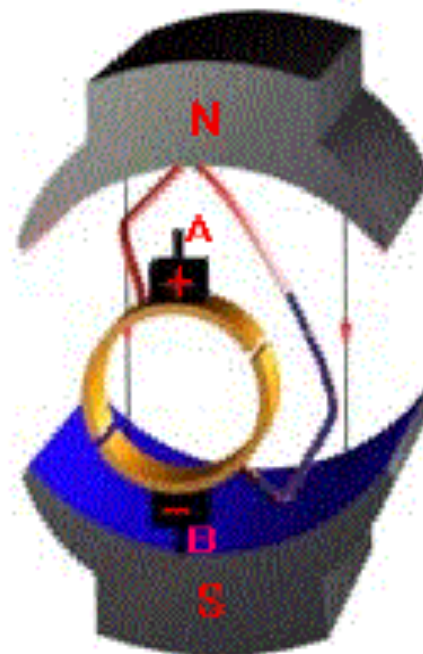
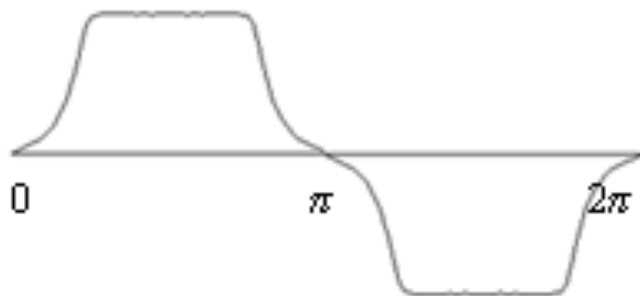
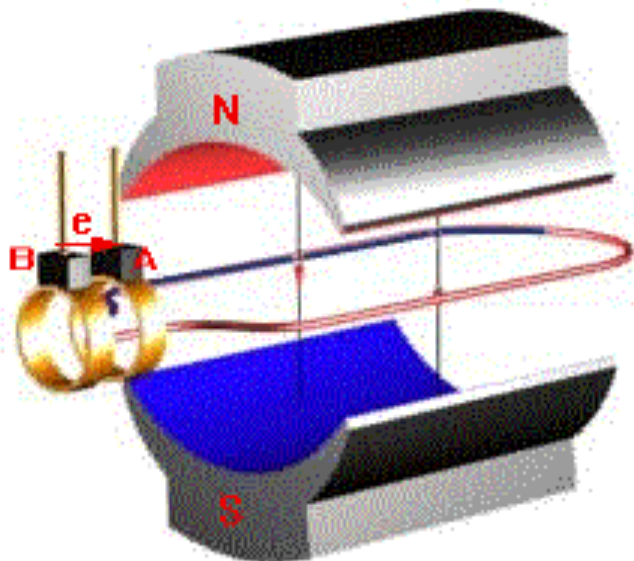
直流电动机的优点：

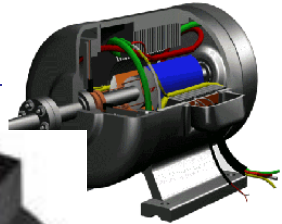
- ① 调速范围宽，且易于平滑调速；
- ② 过载、起动、制动转矩大；
- ③ 易于控制，可靠性高；
- ④ 调速时能量损耗小。





直流电机工作基本原理





直流电动机电磁转矩的产生

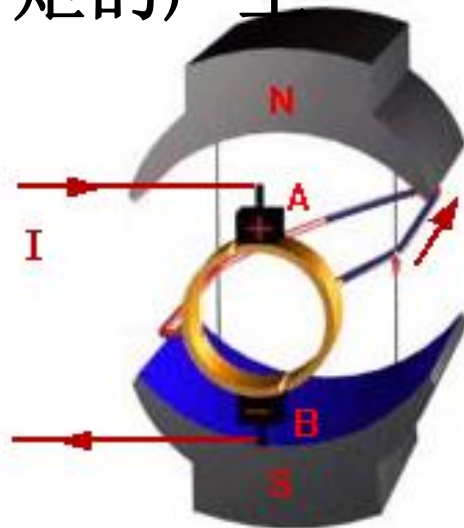
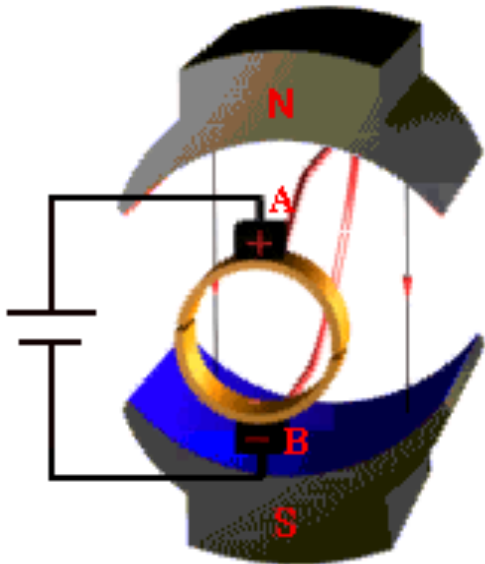


图2

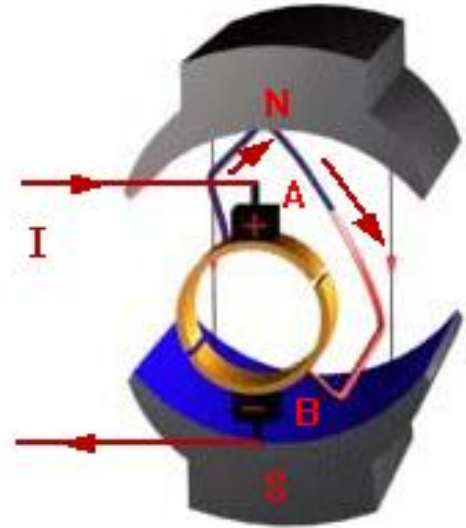


图3

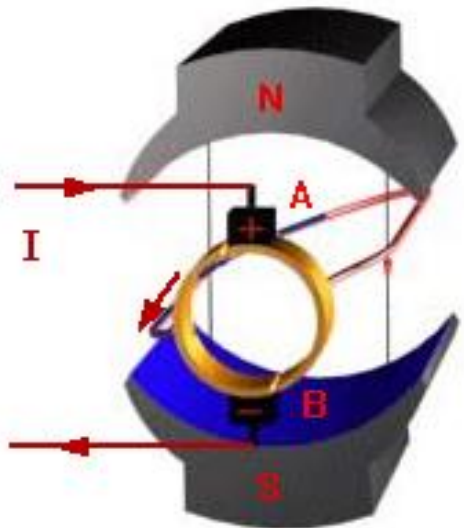


图4

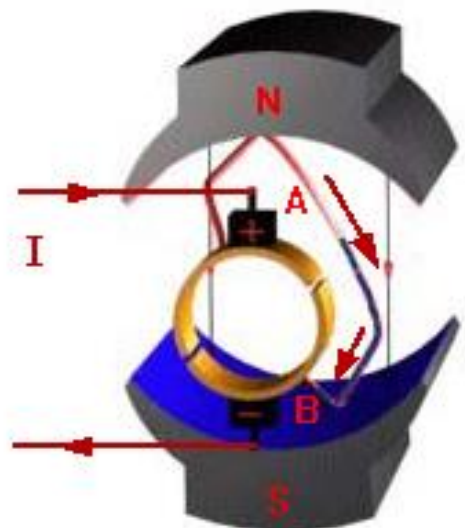
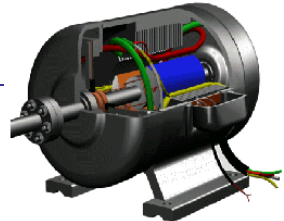


图5



直流电机的主要结构

直流电机

定子

主磁极
换向磁极
机座
端盖
电刷装置

磁极铁心
励磁绕组

(产生励磁磁场)

电刷
刷握
绝缘支架
压紧力调整装置

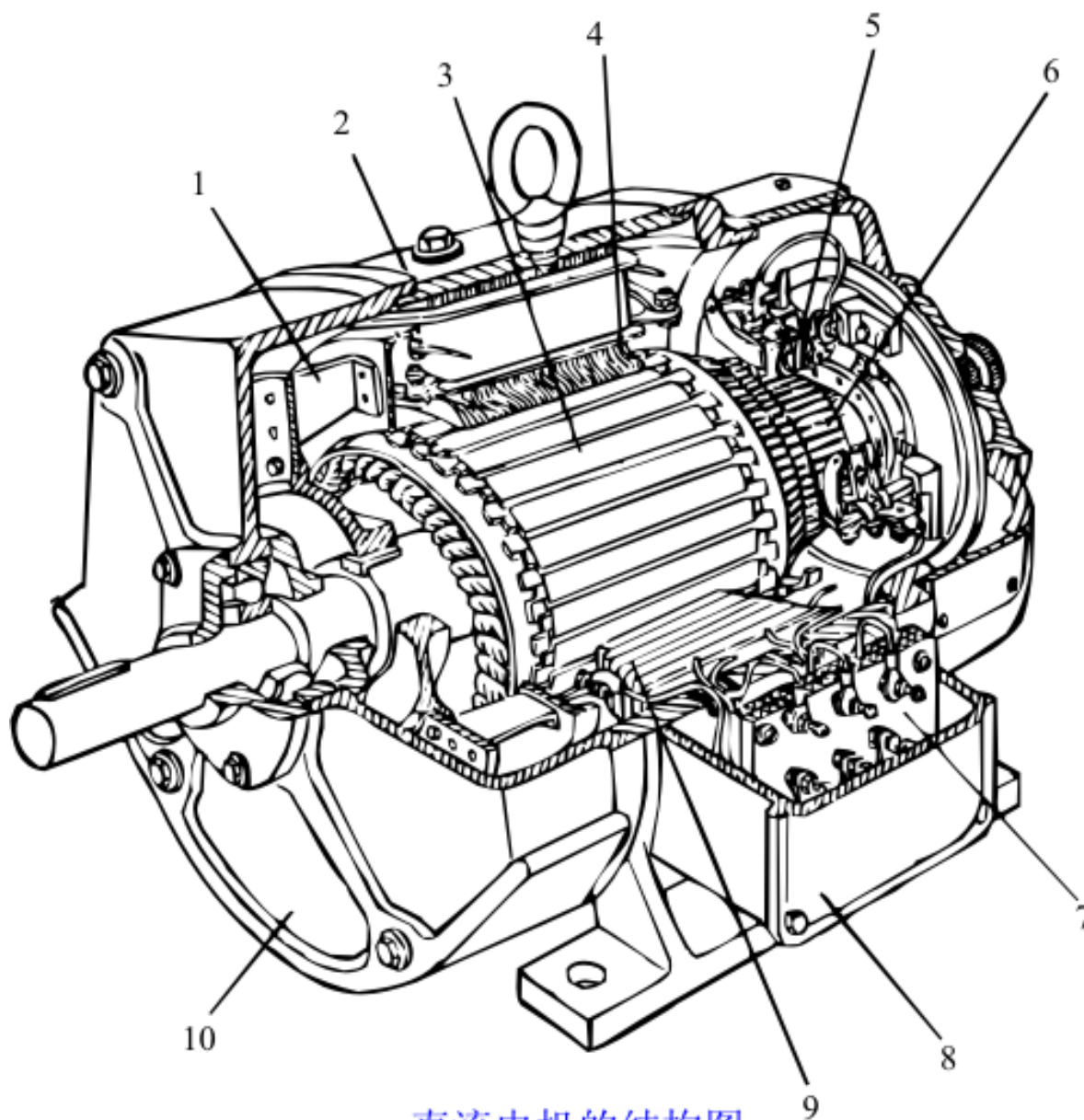
转子

转轴
换向器
电枢铁心
电枢绕组

(产生电动势，流过电流，产生电磁转矩)



直流电机的基本结构



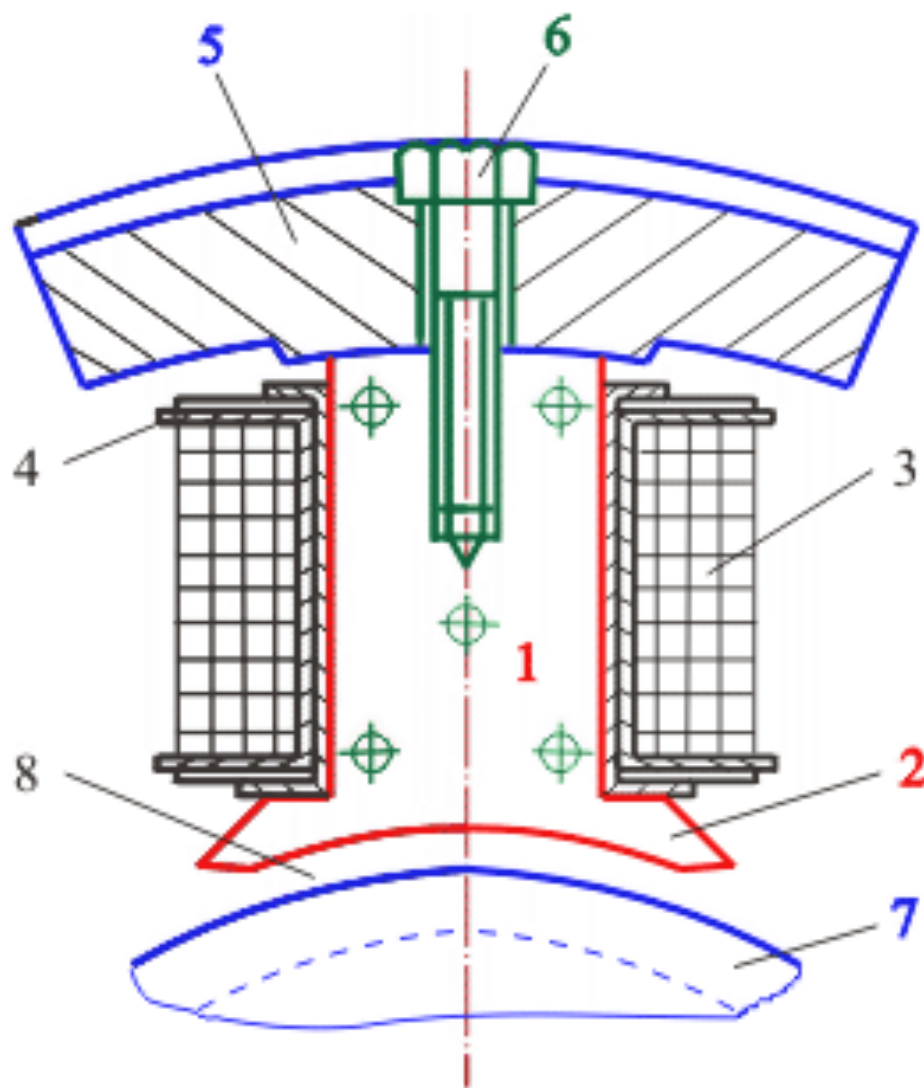
直流电机的结构图

1—风扇 2—机座 3—电枢 4—主磁极 5—刷架
6—换向器 7—接线板 8—出线盒 9—换向极 10—端盖



东南大学
电气工程学院

直流电机的基本结构

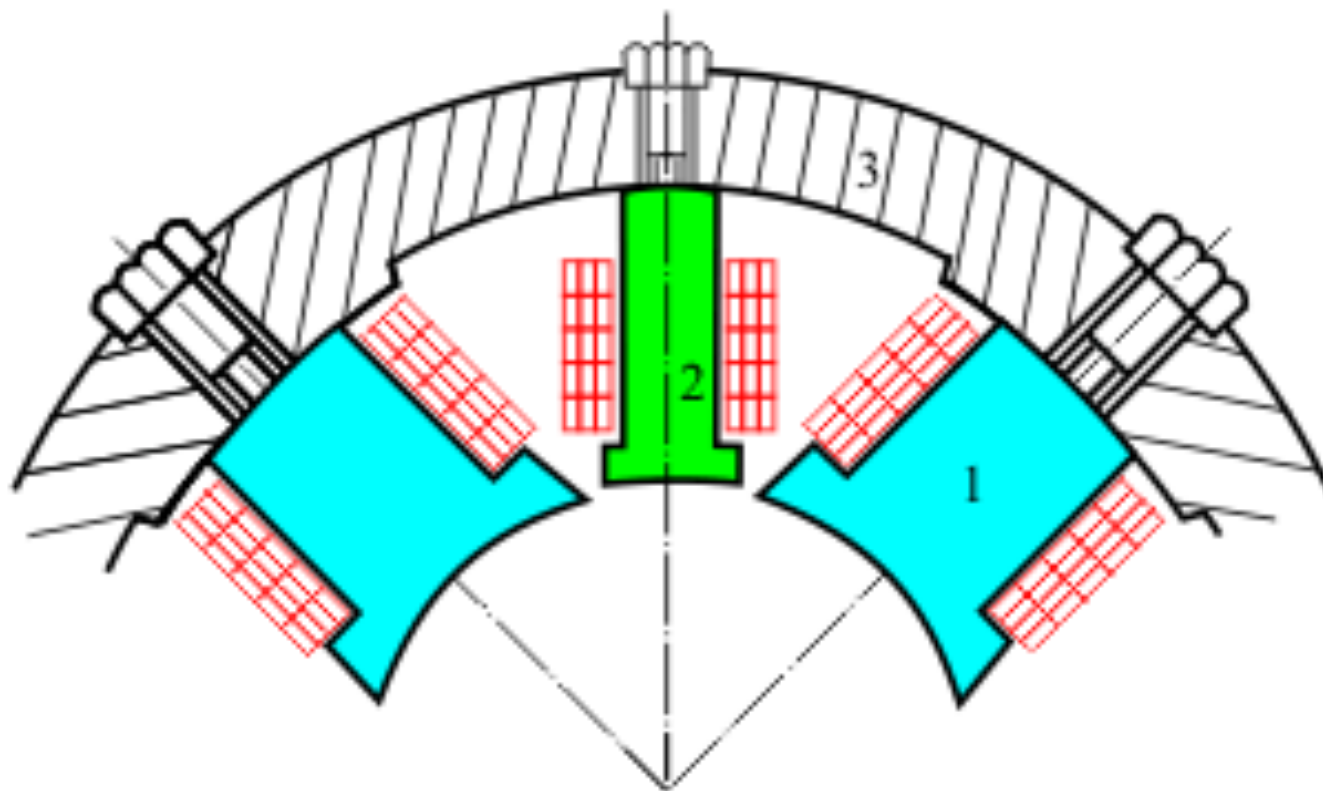


主磁极

- | | | | |
|--------|------|--------|--------|
| 1-主极铁心 | 2-极靴 | 3-励磁绕组 | 4-绕组绝缘 |
| 5-机座 | 6-螺杆 | 7-电枢铁心 | 8-气隙 |



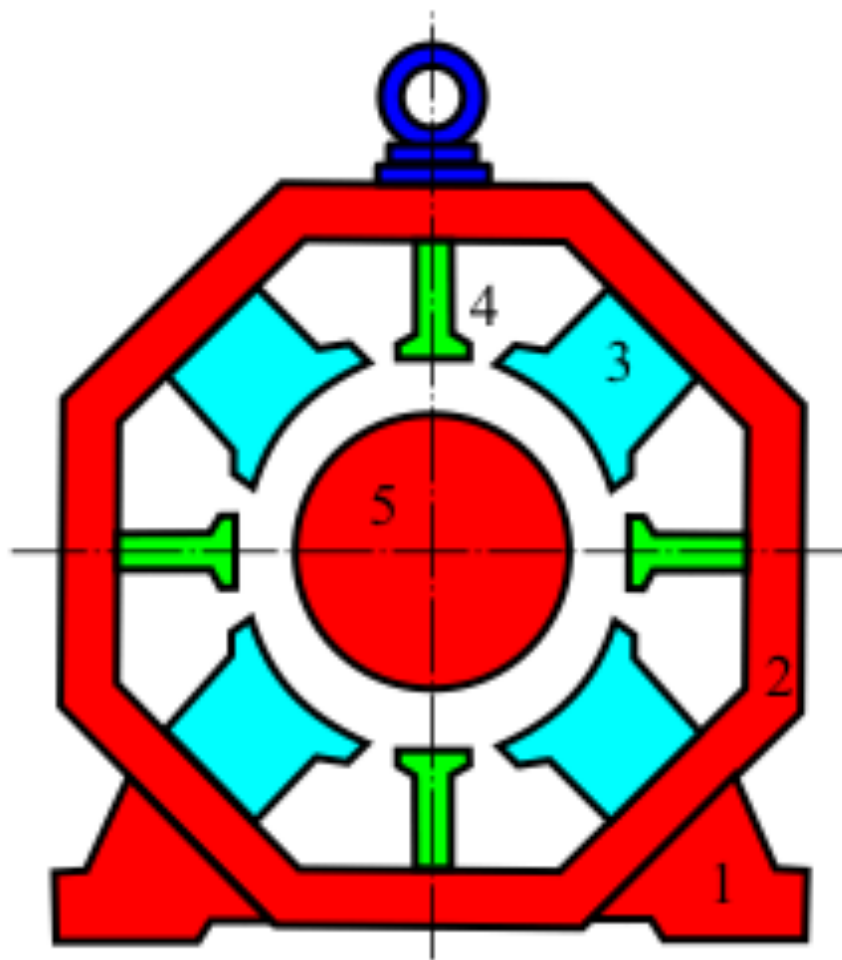
东南大学
电气工程学院



电机中的主极和换向极

1-主极 2-换向极 3-磁轭





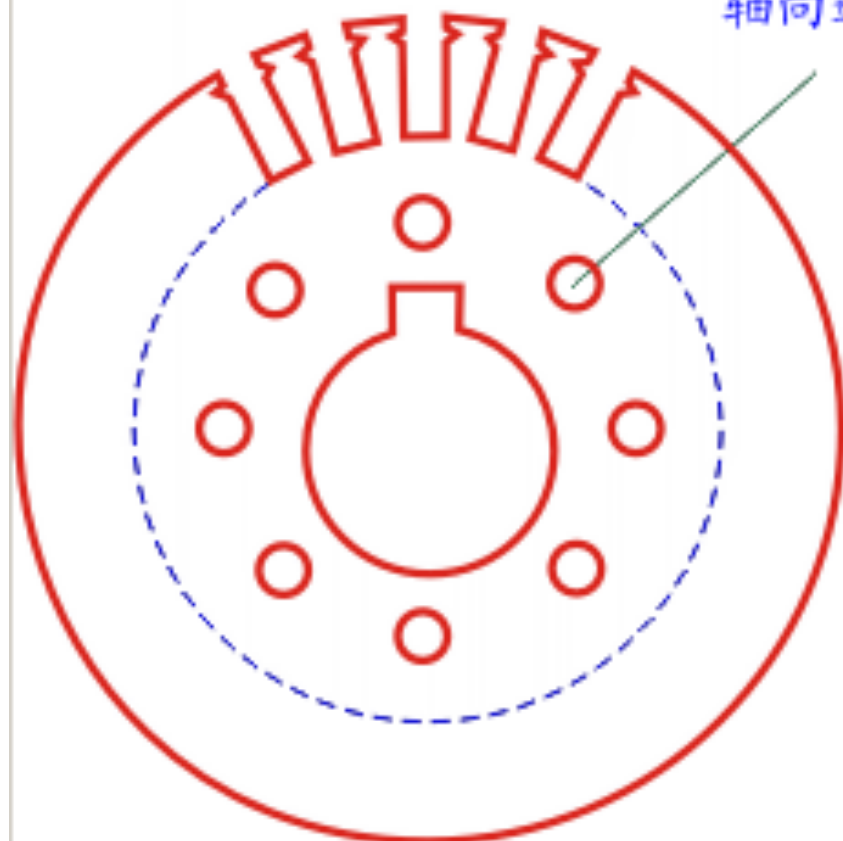
多边形机座示意图

1-机座 2-磁轭 3-主极 4-换向极 5-电枢

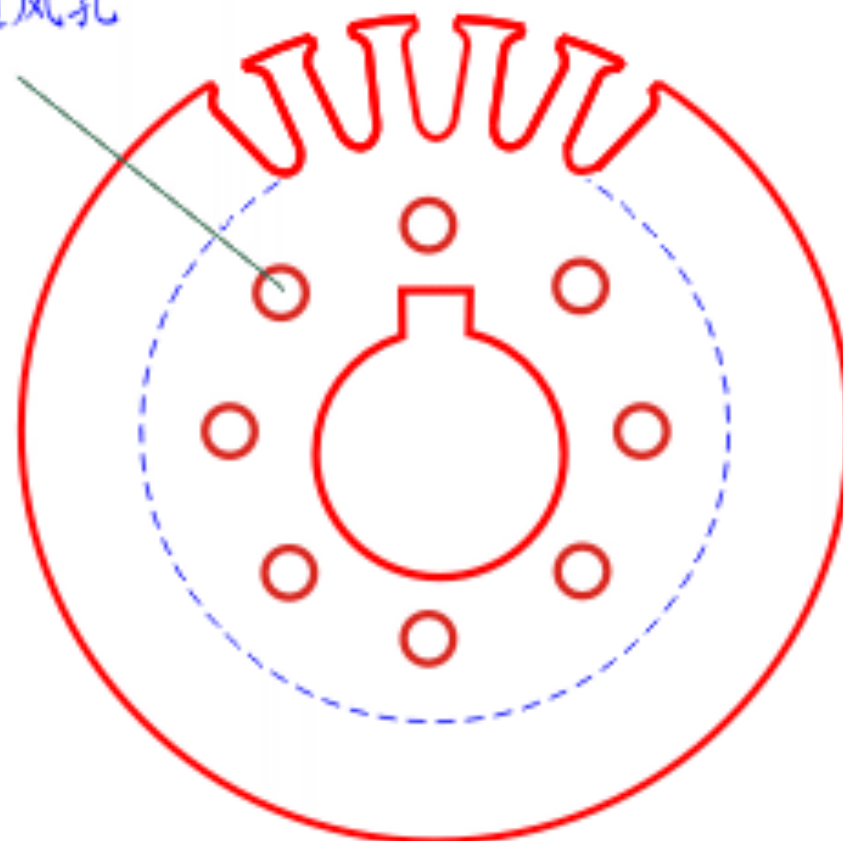




轴向通风孔



矩形槽



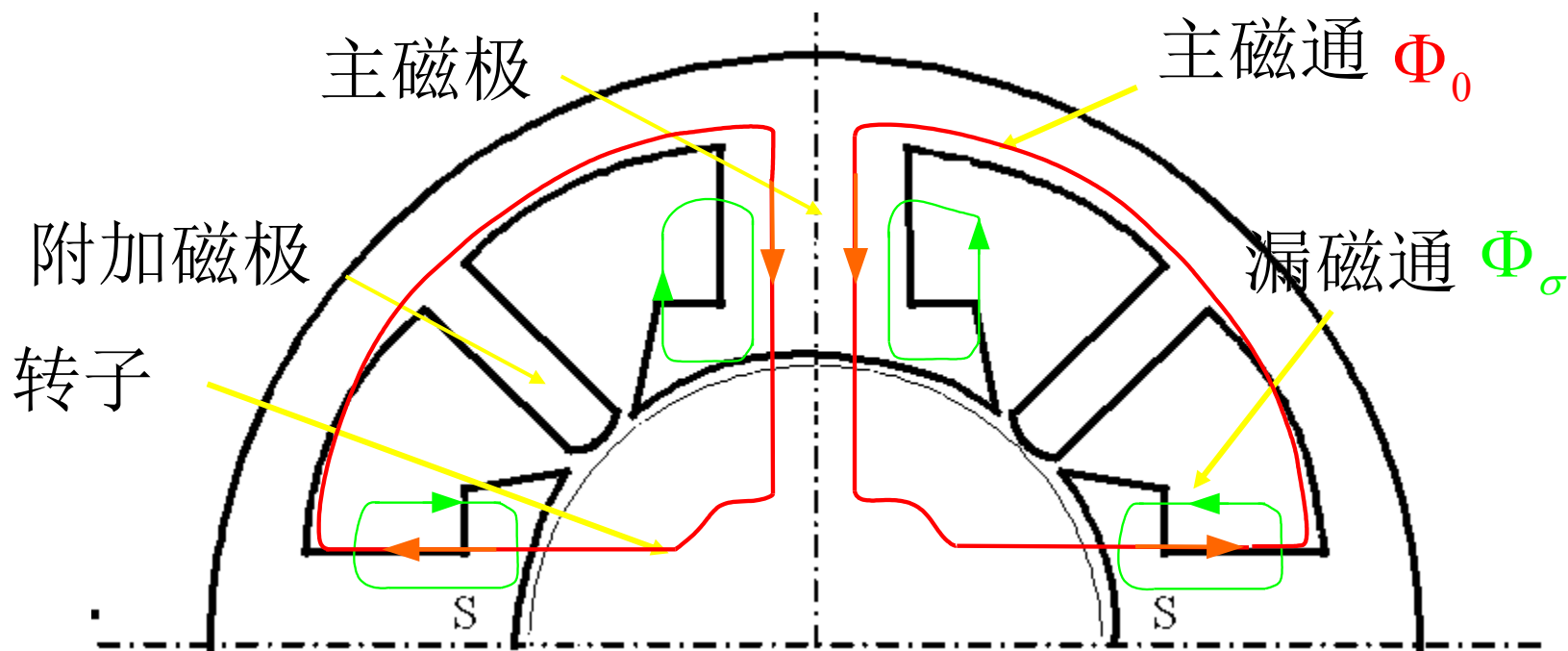
梨形槽

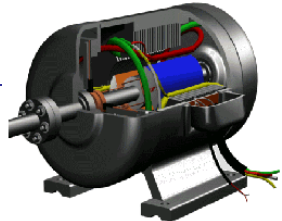
电枢铁心冲片





直流电机的磁路

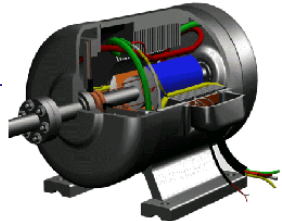




直流电机的电路

- **励磁绕组** 套在磁极铁芯上。
 - 并励绕组——和电枢绕组并联，匝数较多、截面积较小
 - 串励绕组——和电枢绕组串联，匝数较少，截面积较大
 - 从电阻和能量消耗的角度考虑
- **电枢绕组** 嵌在电枢铁芯槽中
 - 叠绕组和波绕组
- **换向极绕组** 与电枢绕组串联，激励换向极磁通。
- **换向器** 将电枢绕组内部的交流电势用机械换接的方法转换为电刷间的直流电势。



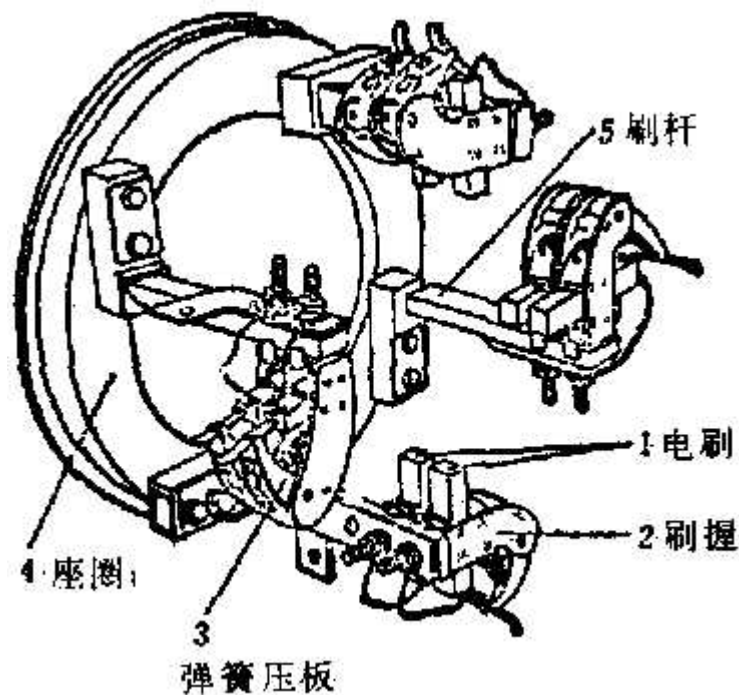


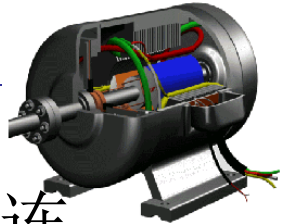
电刷装置

电枢电流能经旋转的换向器（随转子）通过静止的电刷（固定在定子上）接通外电路

1. 将转动的电枢与外电路相连
2. 与换向器配合作用而获得直流电压

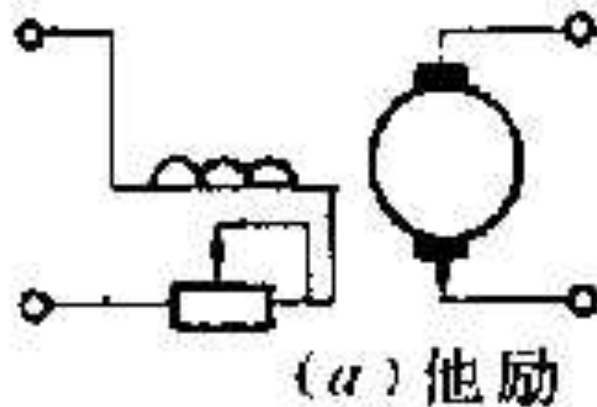
电刷组数一般等于电机极对数





直流电机的励磁方式

- 直流电机励磁方式，即励磁绕组与电枢绕组的连接方式，对电机的运行特性有大的影响
- 他励——励磁由另外独立的直流电源供给，与电枢绕组不相连接

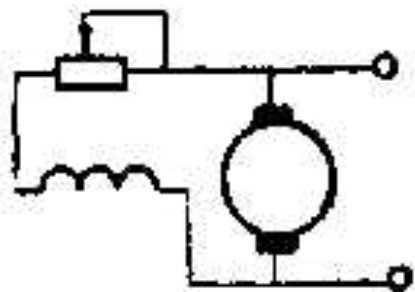


- 自励——励磁绕组与电枢绕组相连接，励磁电流由发电机本身供给

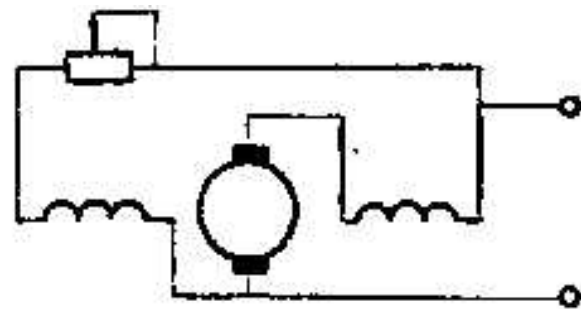




自励的形式



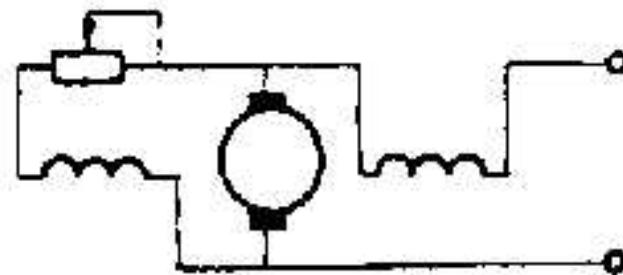
(b) 并励



(d) 复励 (长分接法)



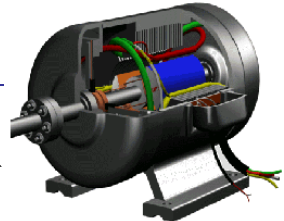
(c) 串励



(e) 复励 (短分接法)

励磁回路的功率占总功率的1-5%。





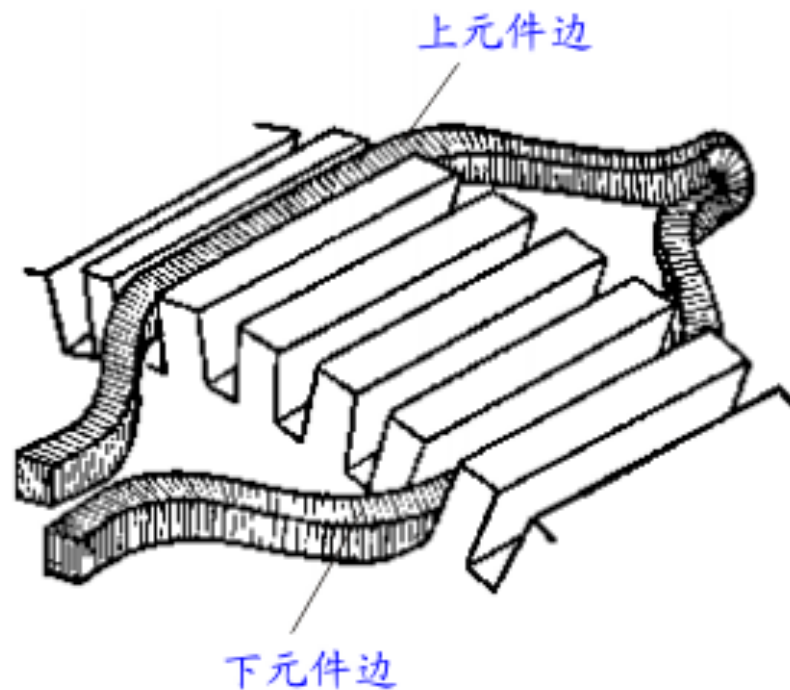
- 作用：电枢绕组——功率绕组。当电枢绕组在磁场中旋转时将感应电势，当电枢绕组中流通电流时，电流和气隙磁场相互作用将产生电磁转矩。通过电枢绕组直流电机进行电功率和机械功率的转换。
- 特点：直流绕组是闭合绕组。每个元件的两端点分别连接在两换向片上，每个换向片连接两个元件，各元件依一定规律依次连接，形成闭合回路。





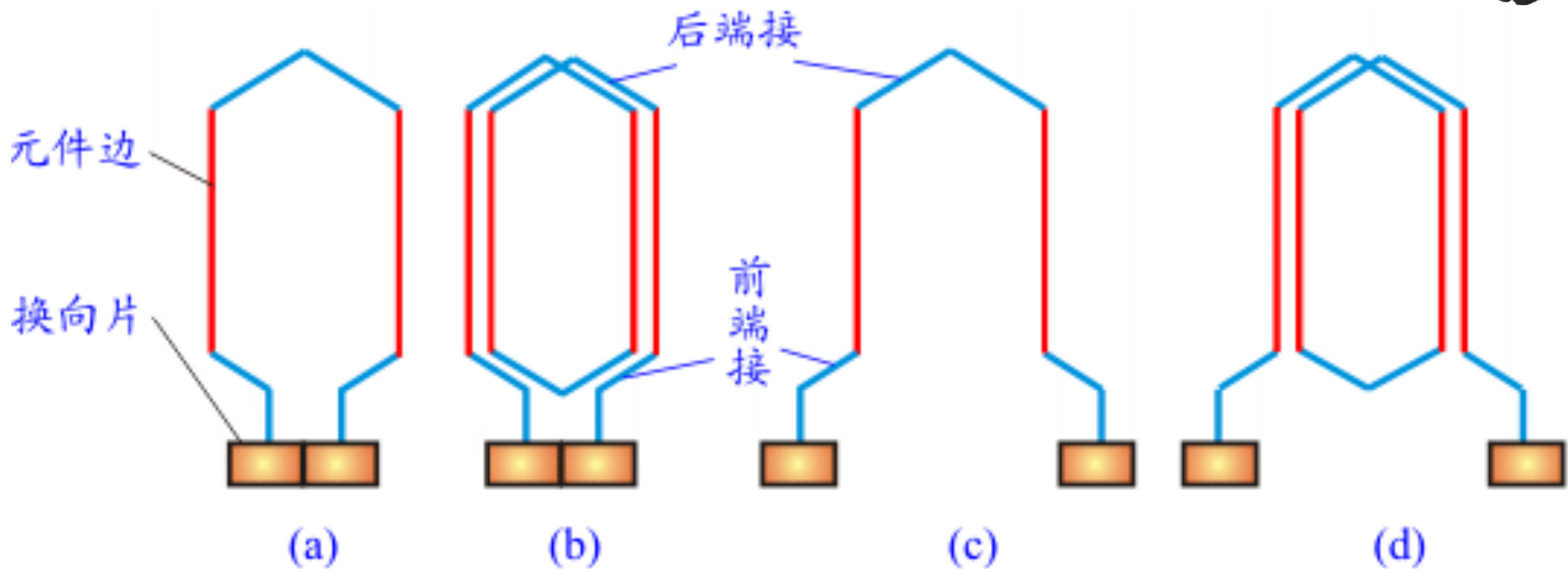
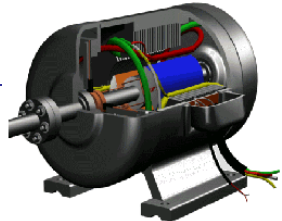
双层绕组

- 线圈的两边都在电枢铁芯表面的槽中：两边都能切割磁场而产生感应电势。
- 两边电势相加：线圈的两边必须处于不同极性的极面下，**线圈的跨距约等于一个极距。**
- 线圈对称排列：当一线圈的一个边在某槽中占有上层位置时，则该线圈的另一边必须放在另一槽下层。



电枢绕组元件在槽内的放置





直流电机电枢绕组元件

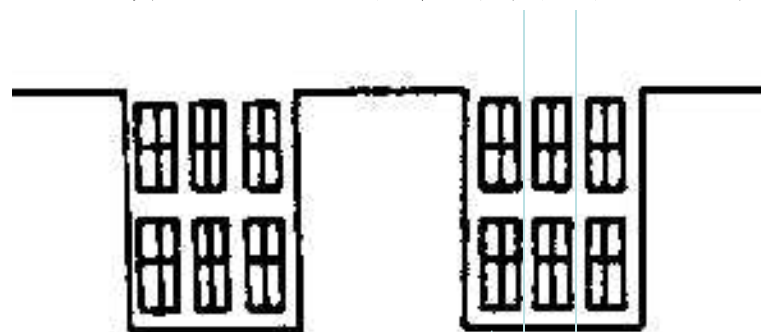
- (a) 单匝叠绕组元件 (b) 两匝叠绕组元件
(c) 单匝波绕组元件 (d) 两匝波绕组元件





虚槽概念

- 在大型电机中、每层可能有N个并列圈边
- 为了改善电机的性能，用更多的元件组成电枢绕组。但电枢铁心不能开太多的槽，采用在每槽的上下层各放置若干元件边。



实槽

虚槽

$$Z_e = Z \cdot C$$

每层有3个圈边

每一元件有两个圈边，

每一换向片上接有两个圈边，

每一虚槽内放置有两个圈边，

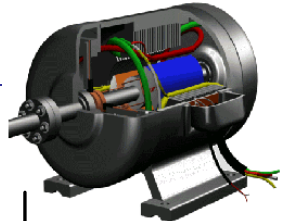
元件数S等于换向片数K，也等于虚槽数

$$S = K = Z_e$$

每线圈有 N_c 匝，则总导体数N

$$N = 2CN_cZ = 2N_cZ_e$$





1 第一节距 y_1

y_1 指一个元件两个边的距离。

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon$$

2 第二节距 y_2

y_2 为元件下层边与其相联结的元件上层边之间的距离。

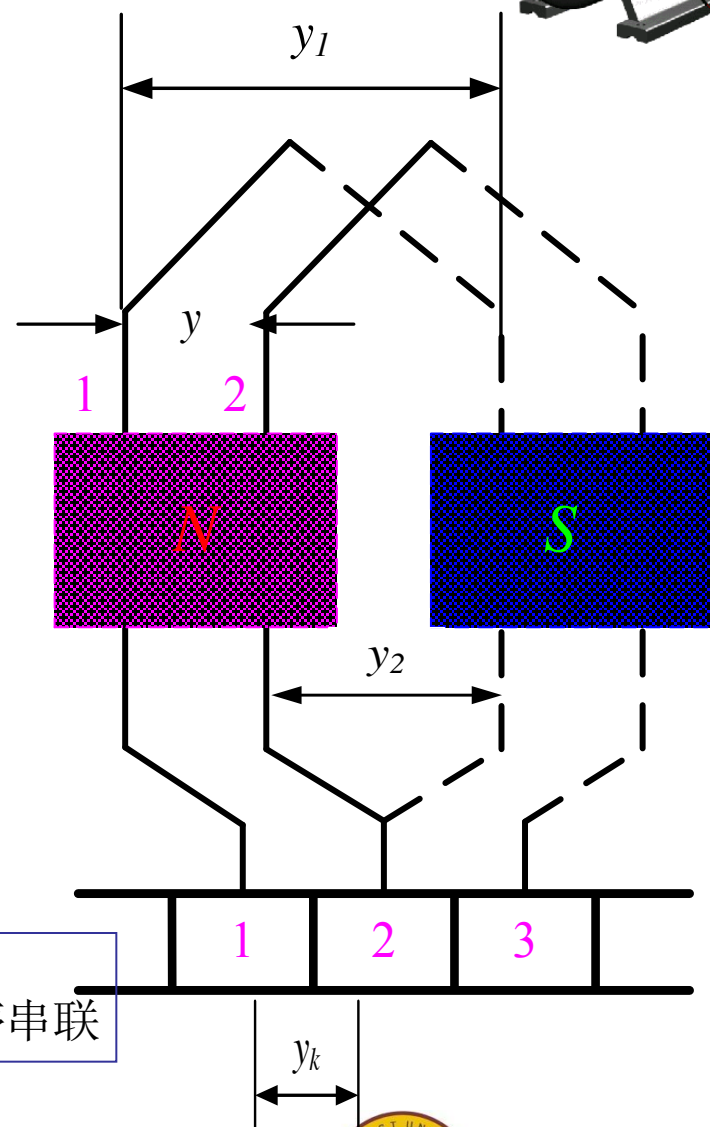
3 合成节距 y 和换向片节距 y_k

y 为相串联的两元件对应边的距离。

$$y = y_1 + y_2 \neq 0$$

保证绕组能循序串联

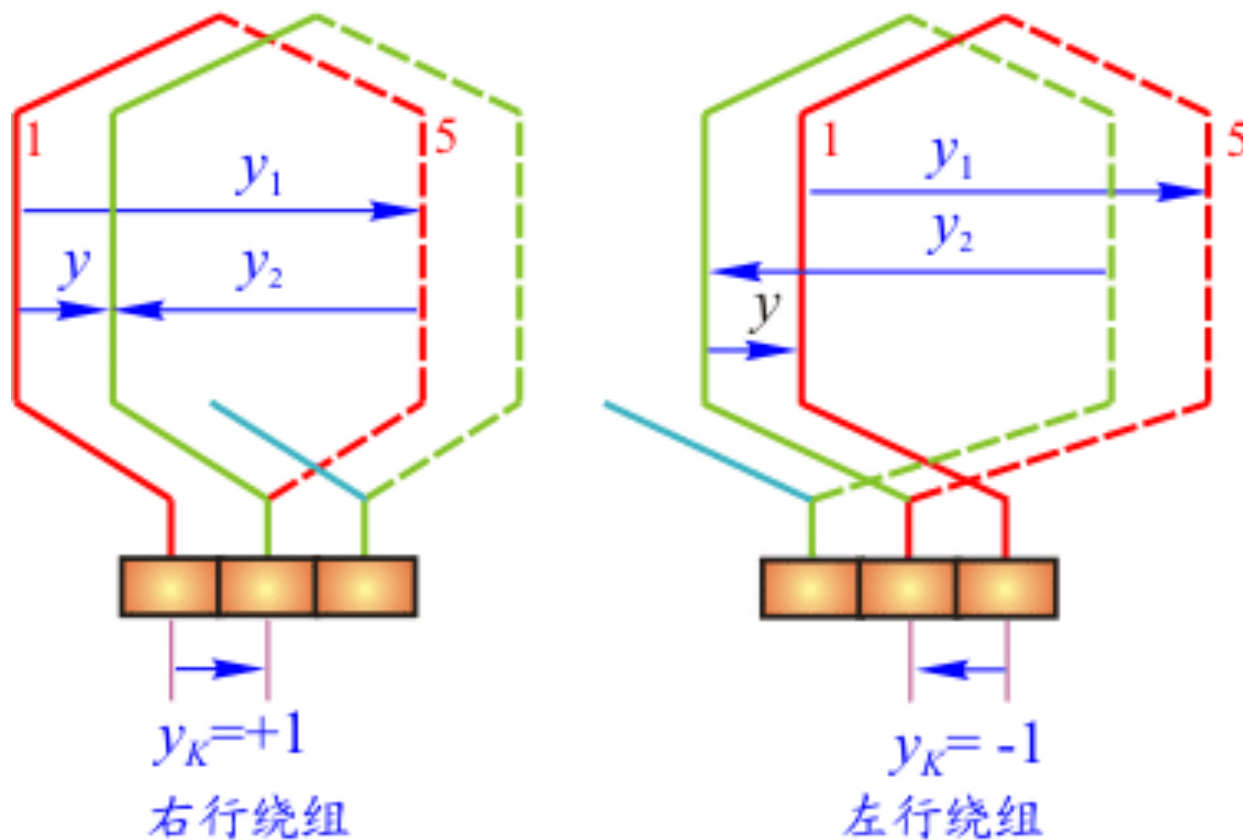
y_k 一个元件的首尾端在换向器上的距离。





单叠绕组

- 每个元件出线端依次连在相邻的换向片上，后一个绕组元件相对前一个绕组元件仅移过一个槽。





例：绕组20虚槽，四极，双层

单叠右行

$$y = y_k = 1$$

第一节距

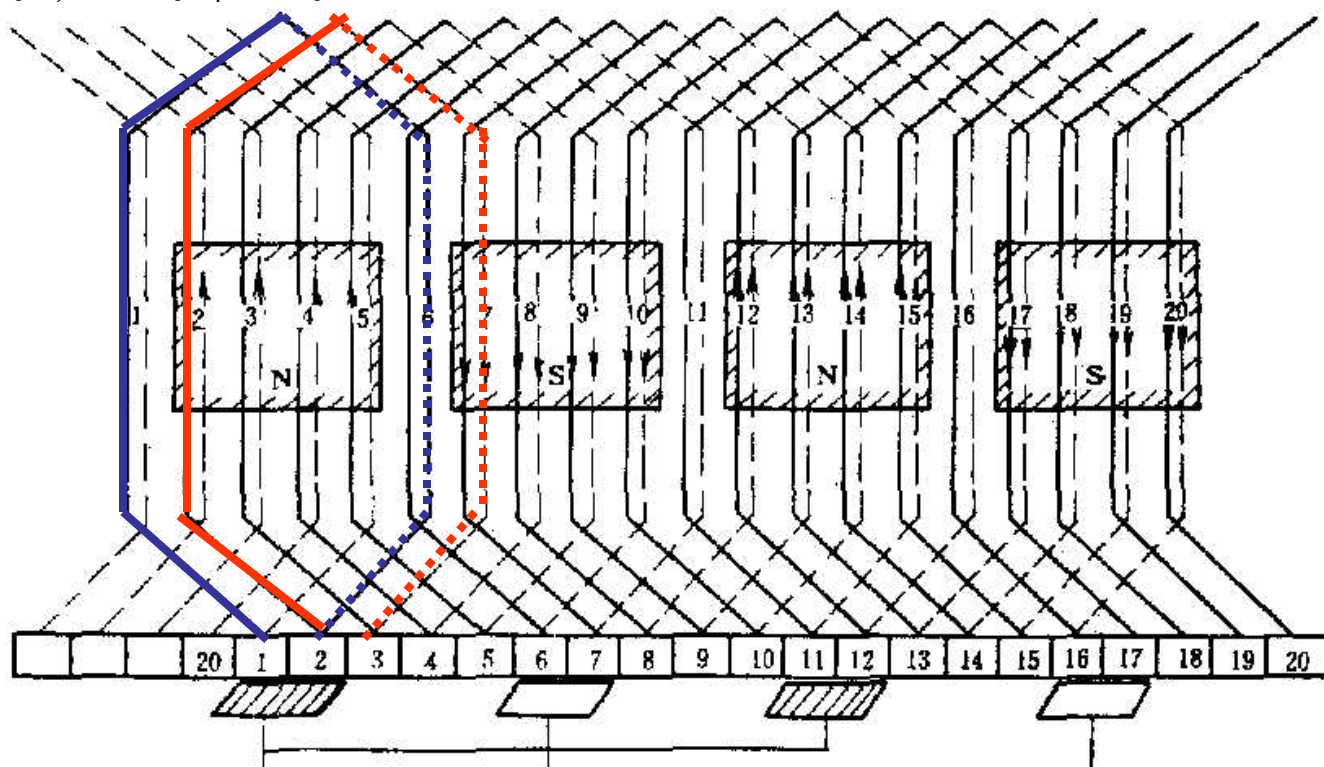
$$y_1 = \frac{Ze}{2p} \pm \varepsilon = \frac{20}{4} = 5$$

第二节距

$$y_2 = y_1 - y = 5 - 1 = 4$$

由右手定则判电流方向

在电枢几何中心线上的元件边感应电势为0



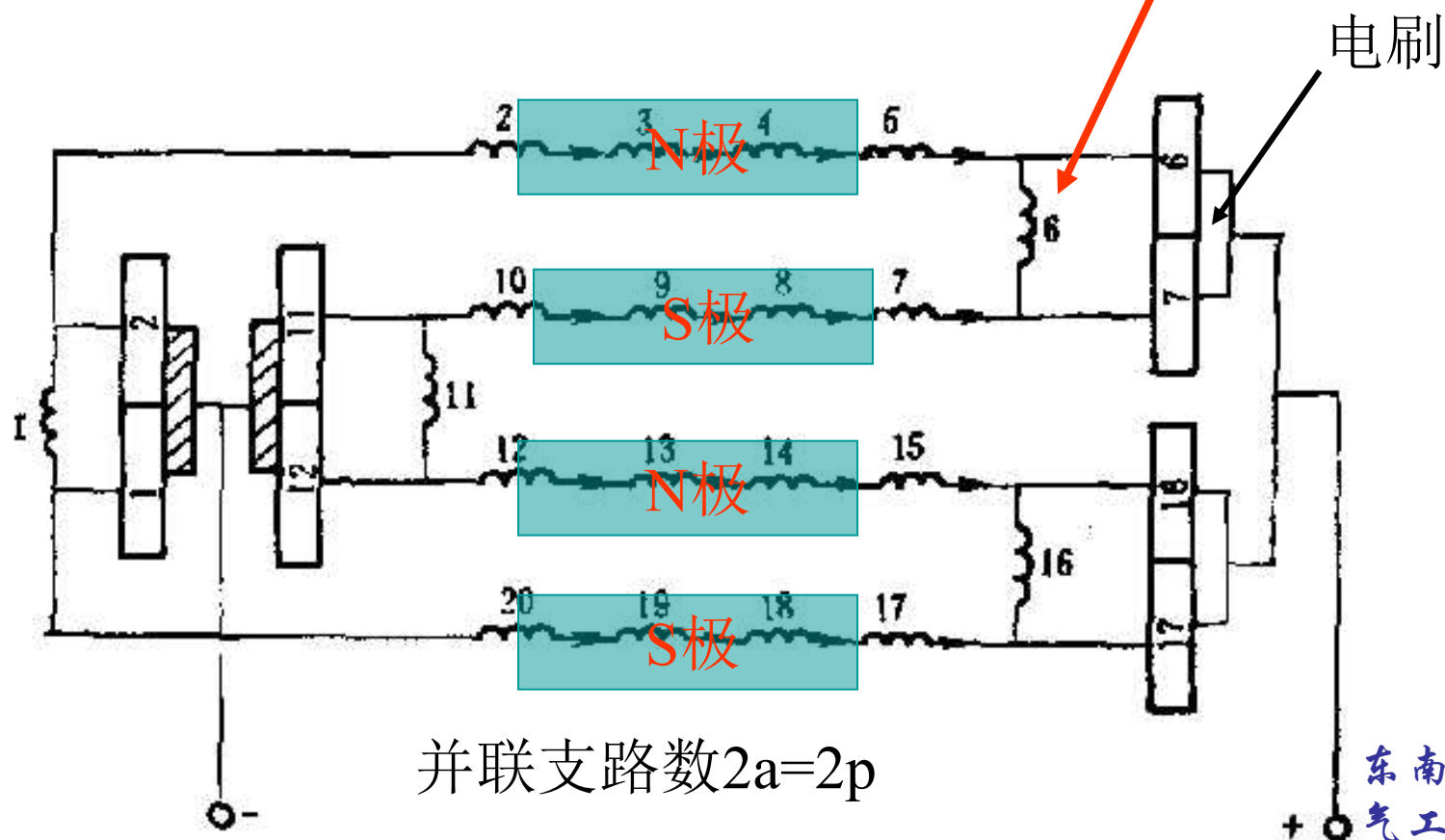
为获得对称的绕组，每元件连接的两换向片的分界线与元件轴线重合



例：绕组20虚槽，四极，双层

电刷之间的引出电势为每一支路个元件的电势和

被电刷短路，处于换向状态





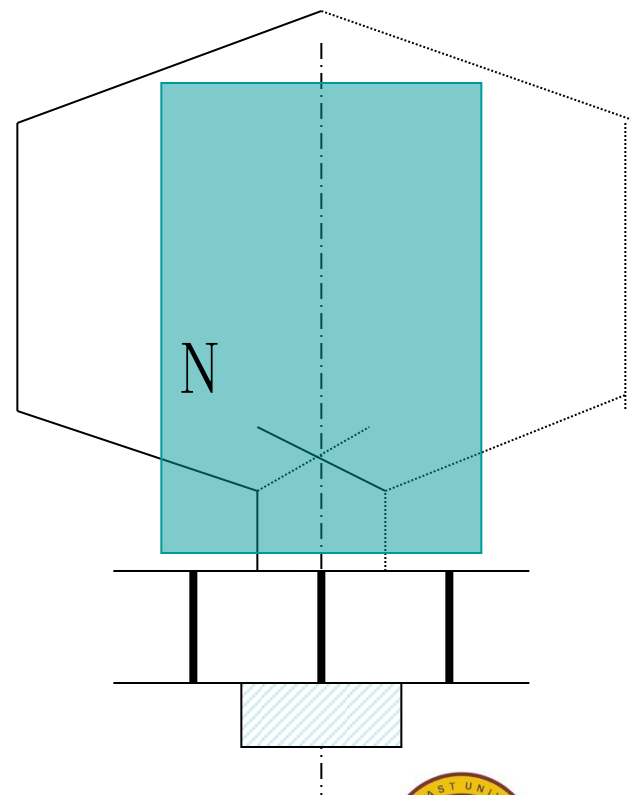
电刷放置法

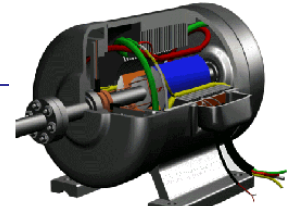
- 使电刷间导出的电势有最大值
- 使与电势为零的元件所连接的换向片相连接

当导体转至交轴时，感应电势为零，电刷应与处于交轴位置的导体相连

如导体对称，则磁极的几何中心线处为电刷位置

换向绕组的绕组轴线、磁极轴线和电刷位置在同一位置上。

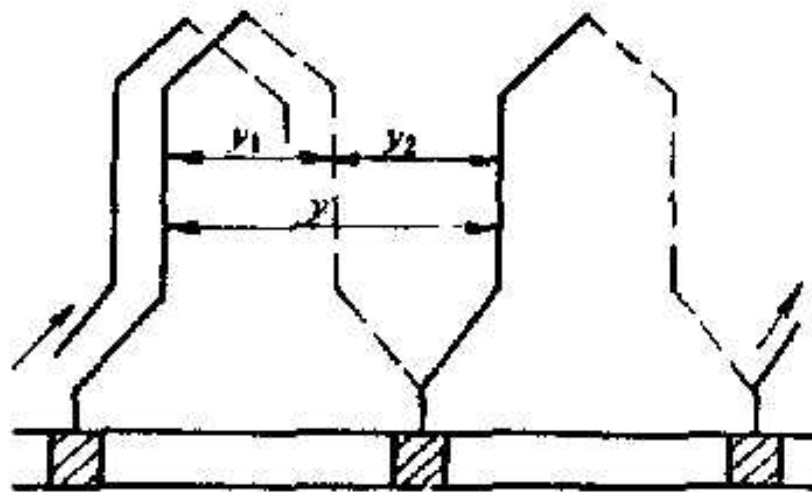
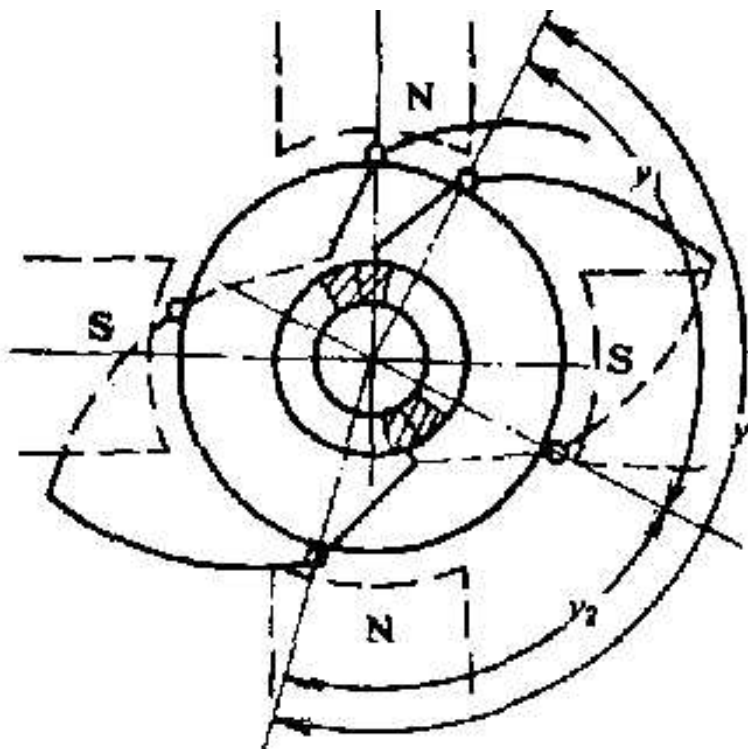




单波绕组

- 每一绕组元件的出发点和终端不在相邻的两换向片上，而相隔近似为一个极距
- 相邻两元件相隔近似一对极距
- 连接 p 个元件后回到出发元件的附近，相隔一个槽

$$y = \frac{k \pm 1}{p}$$

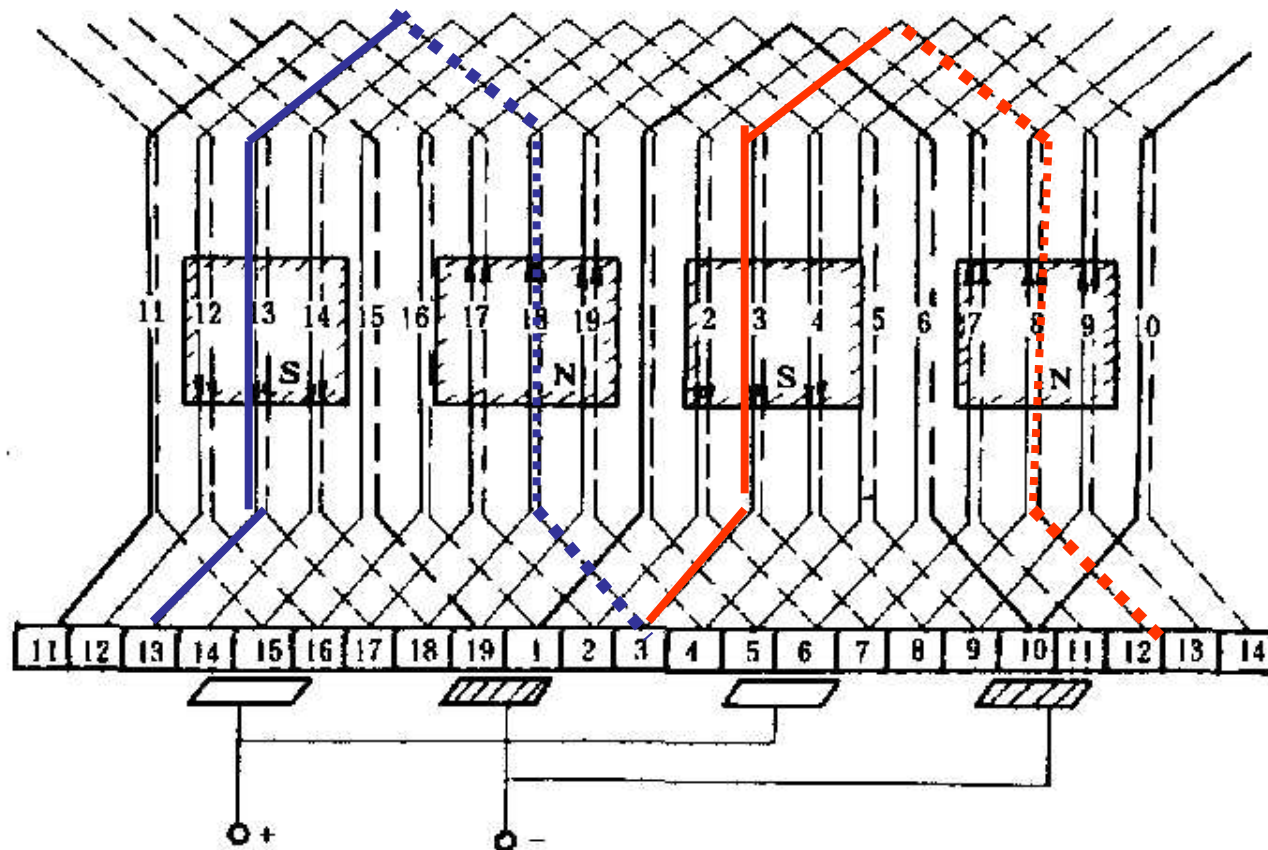




例：电枢绕组19槽，四极

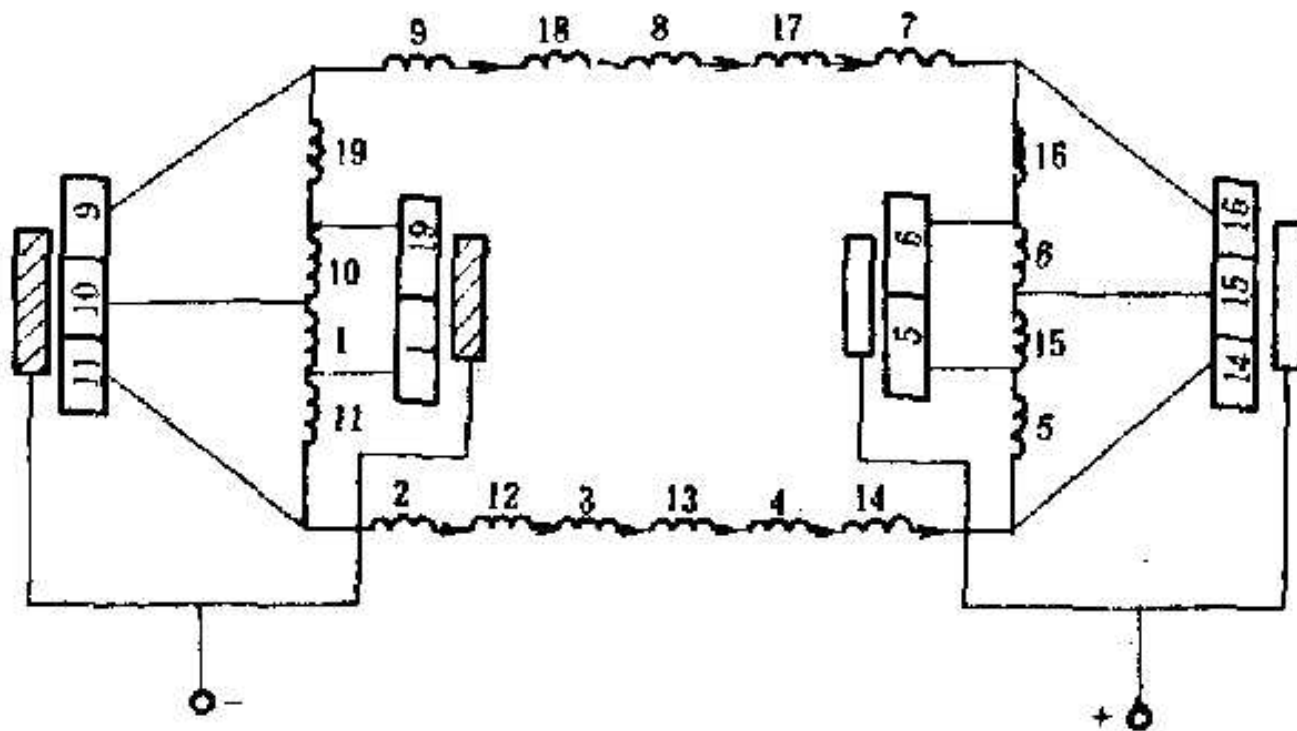
单波左行 $y = \frac{k-1}{p} = \frac{19-1}{2} = 9$

第一节距 $y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon = \frac{19}{4} \pm \varepsilon = 5$ 第二节距 $y_2 = y - y_1 = 4$





例：电枢绕组19槽，四极

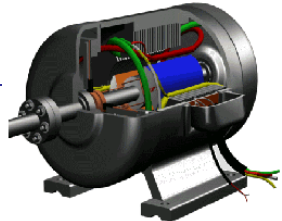


只有两条并联支路：所有N极下的导体并联为一支路，所有S极下的并联为另一支路。 $2a=2$

电刷数原则上等于2，为降低电刷电流密度，可用 $2p$ 只电刷

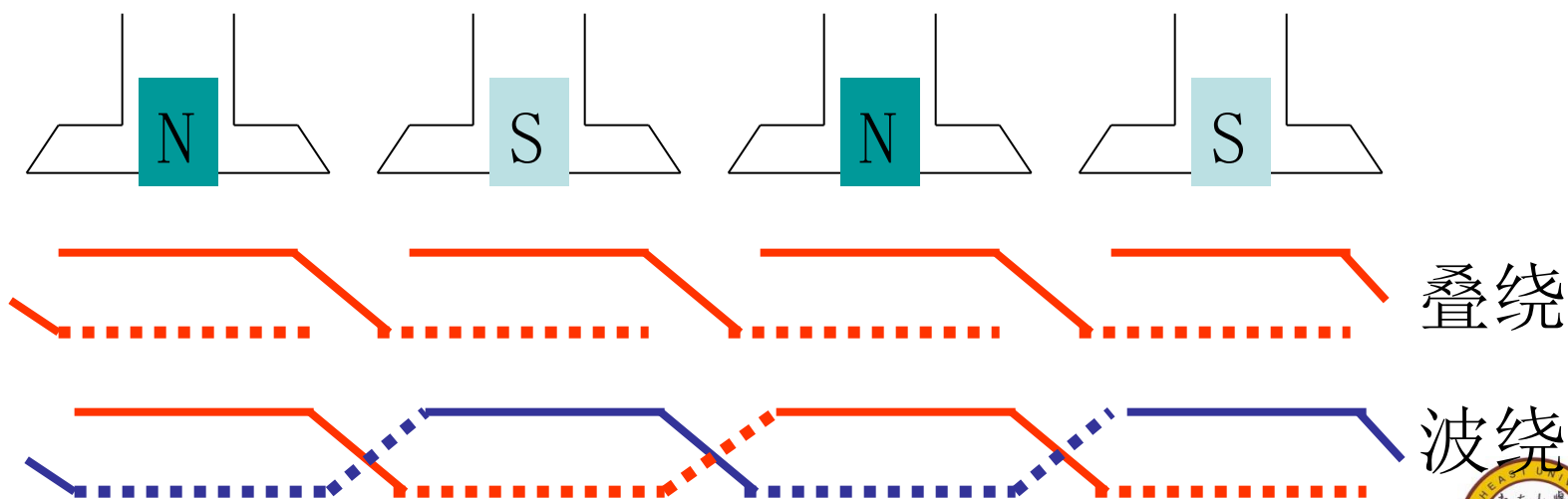
电刷位置：应与电势为零的元件所连接的换向片相连





单叠绕组和单波绕组的差别

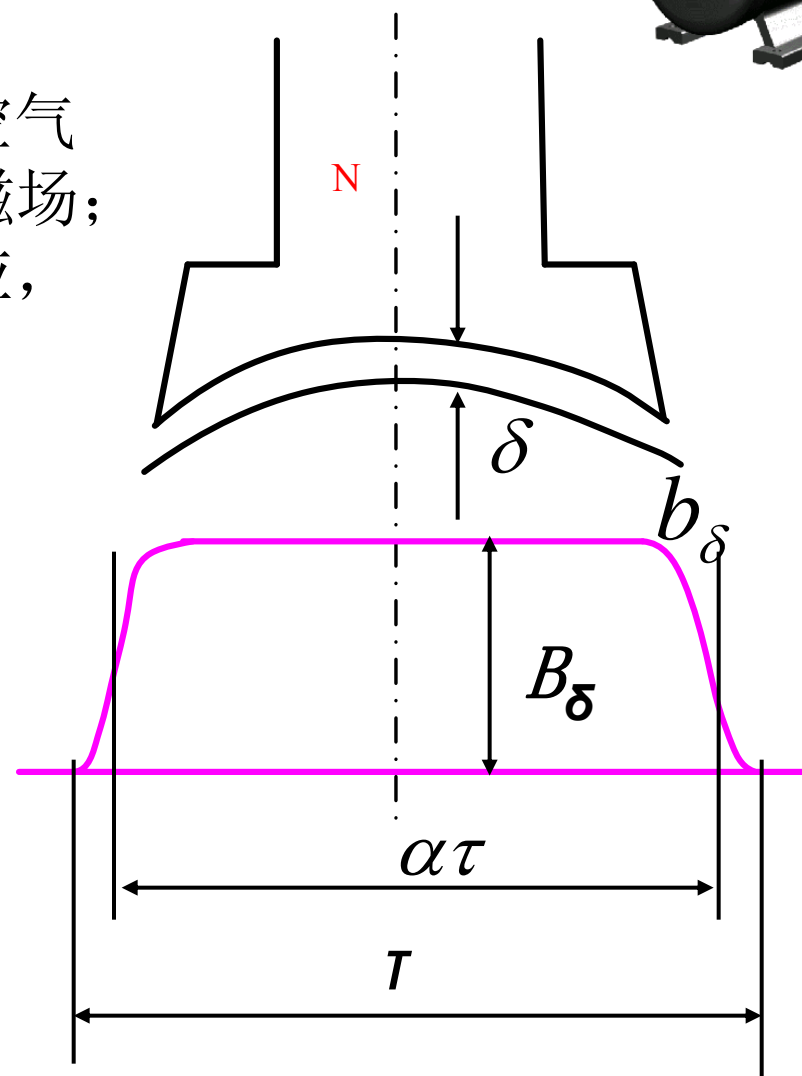
- 单叠绕组：各个极面下上层的绕组元件构成一支路，并联支路数等于极数
- 电枢间电势较小，电枢电流较大，称并联绕组
- 单波绕组：N极下上层的绕组元件串联为一支路，S极下的串联为另一支路，并连支路数恒等于2
- 电刷间电势较大，电枢电流较小，称串联绕组。





空载时直流电机的磁场

- 由磁极的直流励磁电流产生，空气隙磁场**不随时间变化**，是恒定磁场；空间上，忽略极面下的齿槽效应，**沿极面均匀分布**。
- 空间上，**非正弦分布**，在导体中感应电势将包括有高次谐波。





主磁通与磁极漏磁通

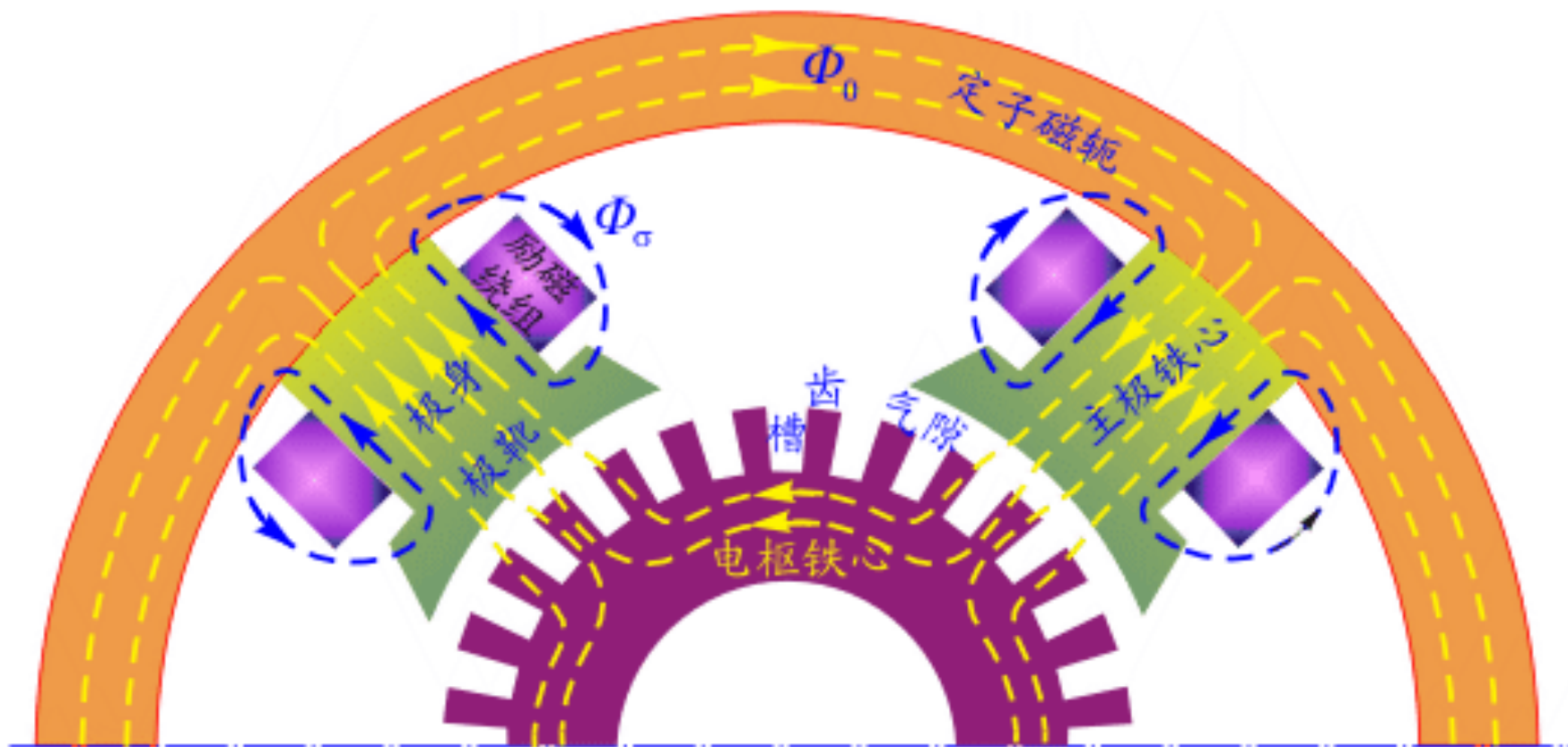
- 主磁通 Φ : 产生感应电势和电磁转矩的有效磁通, 通过空气隙, 同时匝连电枢绕组和励磁绕组。
- 磁极漏磁通 Φ_{σ} : 从磁极的侧面逸出, 只和励磁绕组键链。
- 磁极磁通: 包括主磁通和漏磁通, $k_{\sigma} \Phi = \Phi + \Phi_{\sigma}$

$$\text{漏磁系数} \quad K_{\sigma} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi}$$

一般为1.15 – 1.25

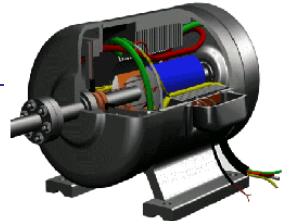
- 电枢磁通: 主磁通的一半
- 定子磁轭磁通: 磁极磁通的一半





一台四极直流电机中的空载磁场分布(1/2模型)





负载时电枢电流产生的磁势

- 电枢磁势的存在使空气隙磁势的分布情况改变，从而使空气隙磁场分布情况改变。
- 对于一定的电枢电流，空气隙磁场仍然是一恒定磁场，即不随时间变化

由于静止的电刷和运动的换向器的共同作用，电刷间连接的导体时刻在变化，但电刷间导体电流产生的磁势不变。

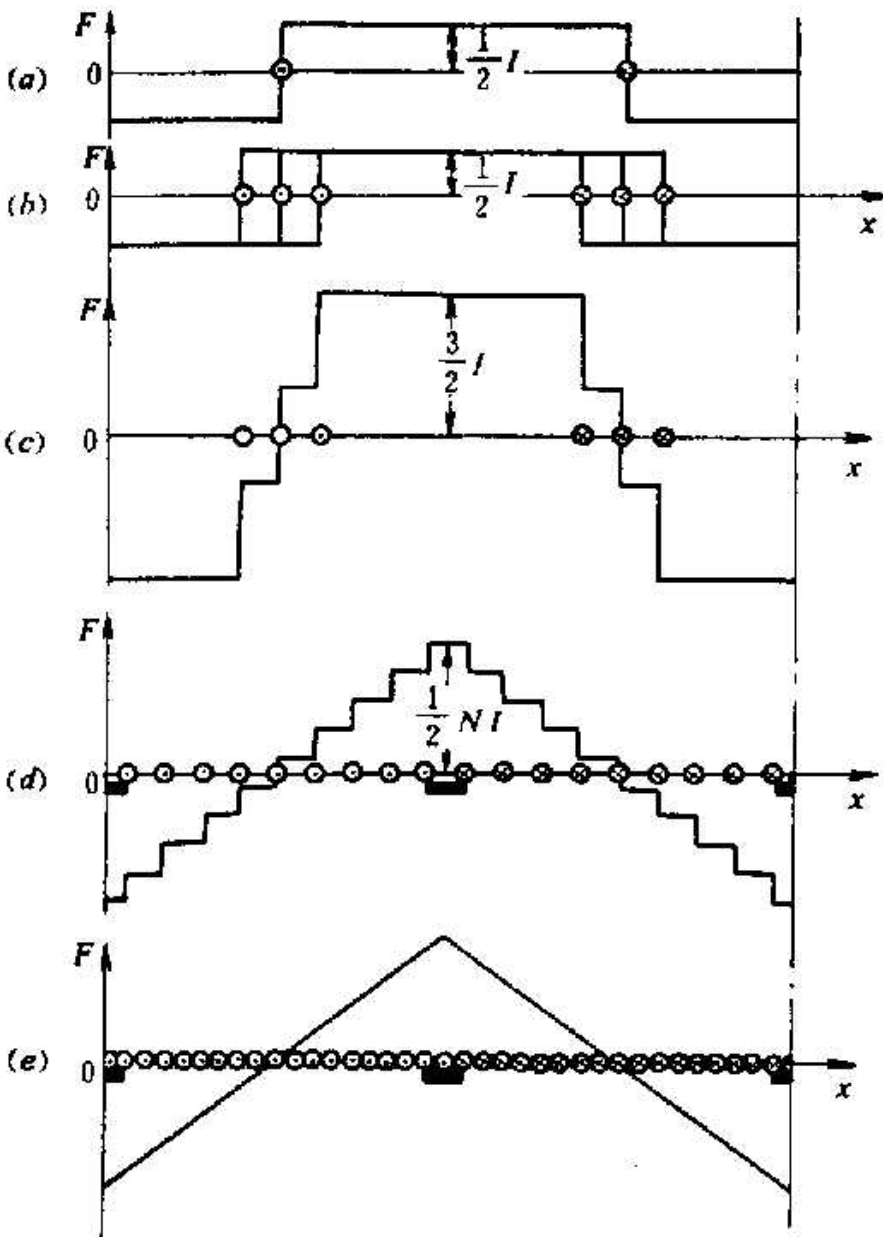
电枢磁势和主磁极的相对位置一定。

同步电机的电枢磁势和主磁极也相对静止，但其相对位置随负载功率因数而变化



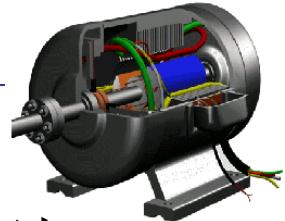


直流电机电枢绕组磁势波形



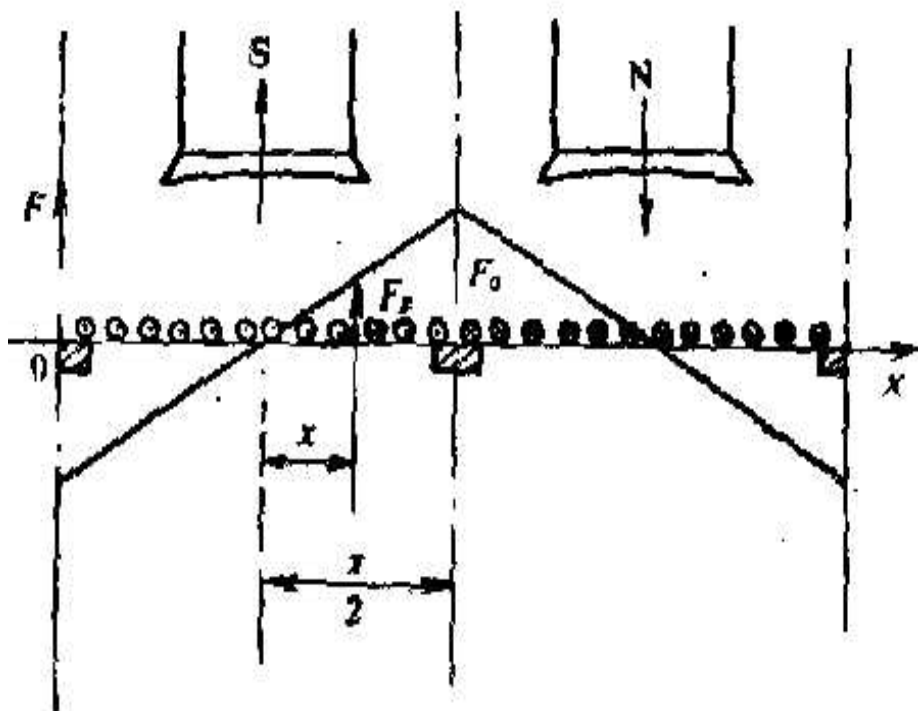
- 直流电机的电枢磁势是幅值固定的空间分布波，只是空间的函数
- 交流电机的电枢磁势是幅值随时间按正弦规律脉动的空间分布波
- 如沿电枢分布的线圈无限增多，则级形波将趋近于三角形波





任意点电枢磁势的计算

- 条件：设电枢绕组的导体数为 W ，极数为 $2p$ ，则一个极距内的导体数为 $W / 2p$ 。电刷电流为 I_a ，并联支路数为 $2a$ ，则流过每一导体的电流为 $I_a / 2a$



$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{2p} \cdot \frac{I_a}{2a} = \frac{WI_a}{8pa}$$

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{2a}{2p\tau} \tau = \frac{1}{2} A \tau$$

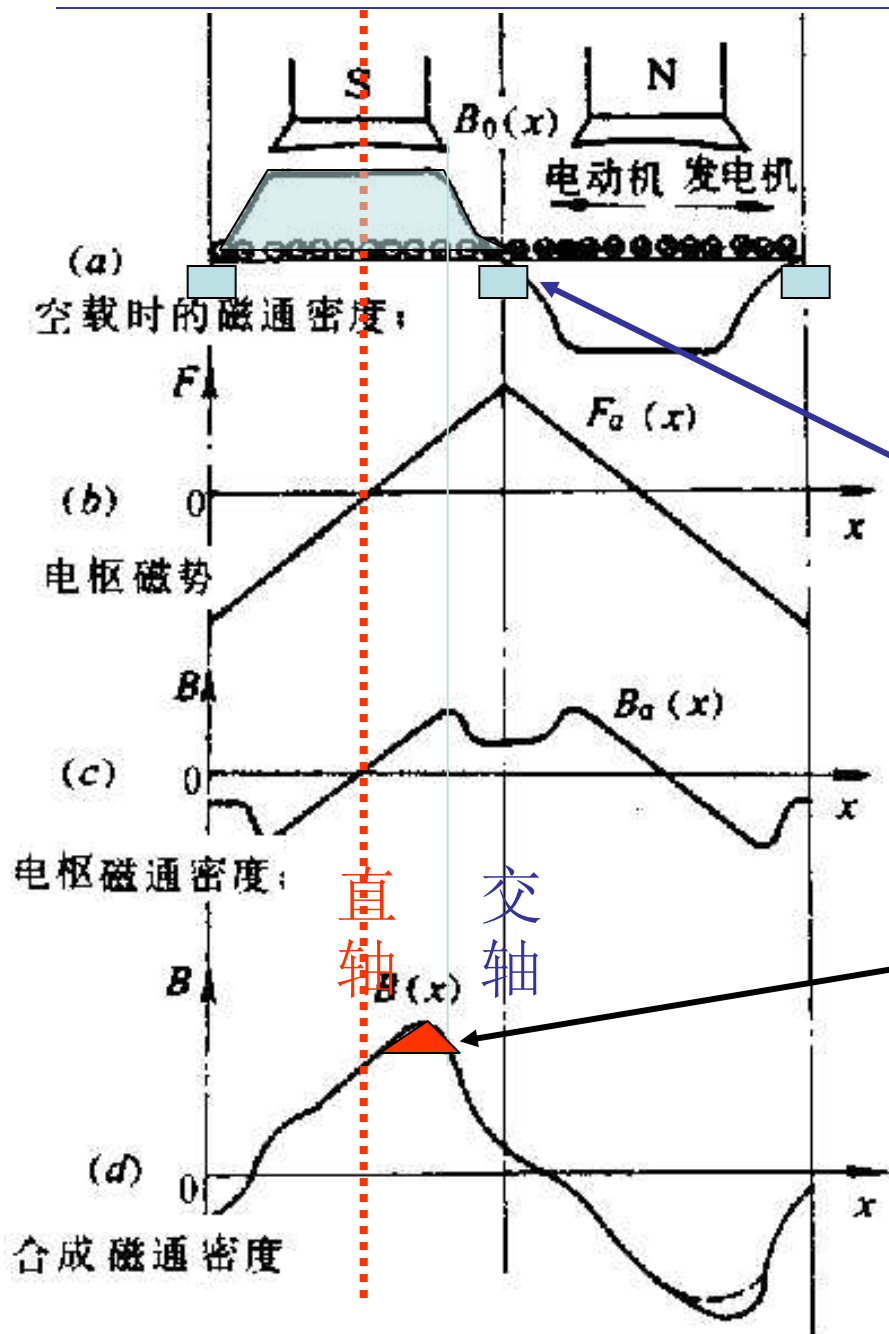
$$F_x = F_a \frac{2x}{\tau} = Ax$$

线负载 A ：沿着电枢圆周每单位长度内的电流安培数





交轴电枢反应



电枢磁势位置取决于电刷位置，**电刷位于交轴**，电枢磁势轴线也在交轴，为交轴电枢反应。

极尖处磁密最大

且由于其饱和程度的提高，饱和影响使高峰略有下降，即极面下的总磁通略减小，

呈去磁作用

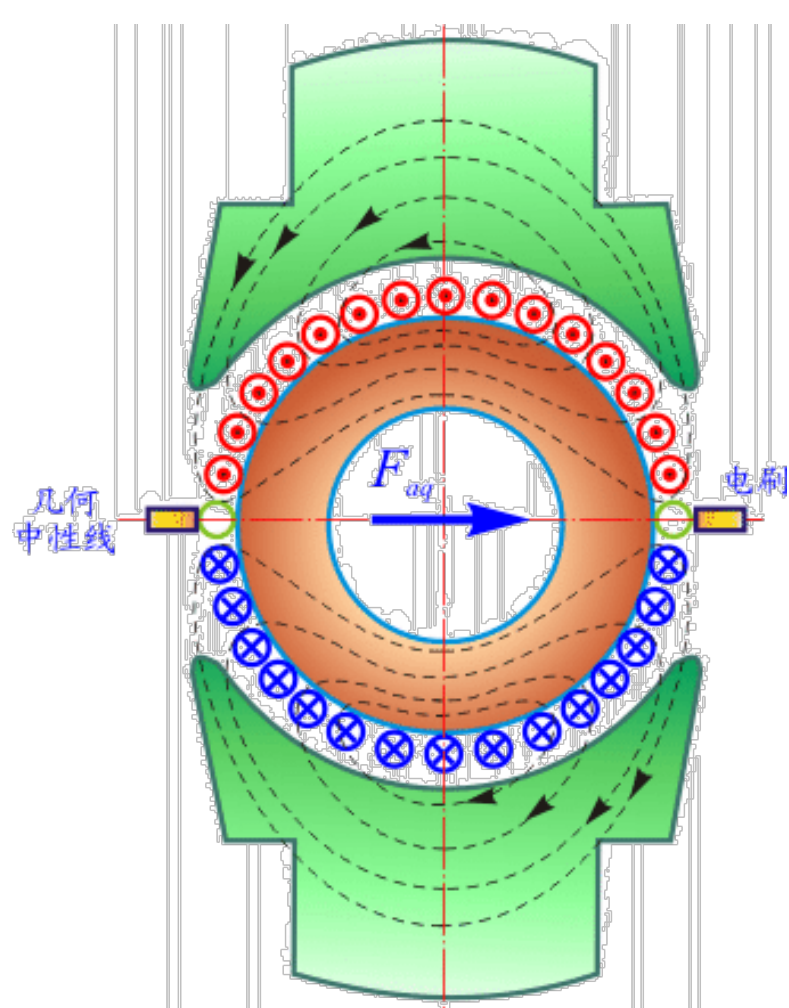




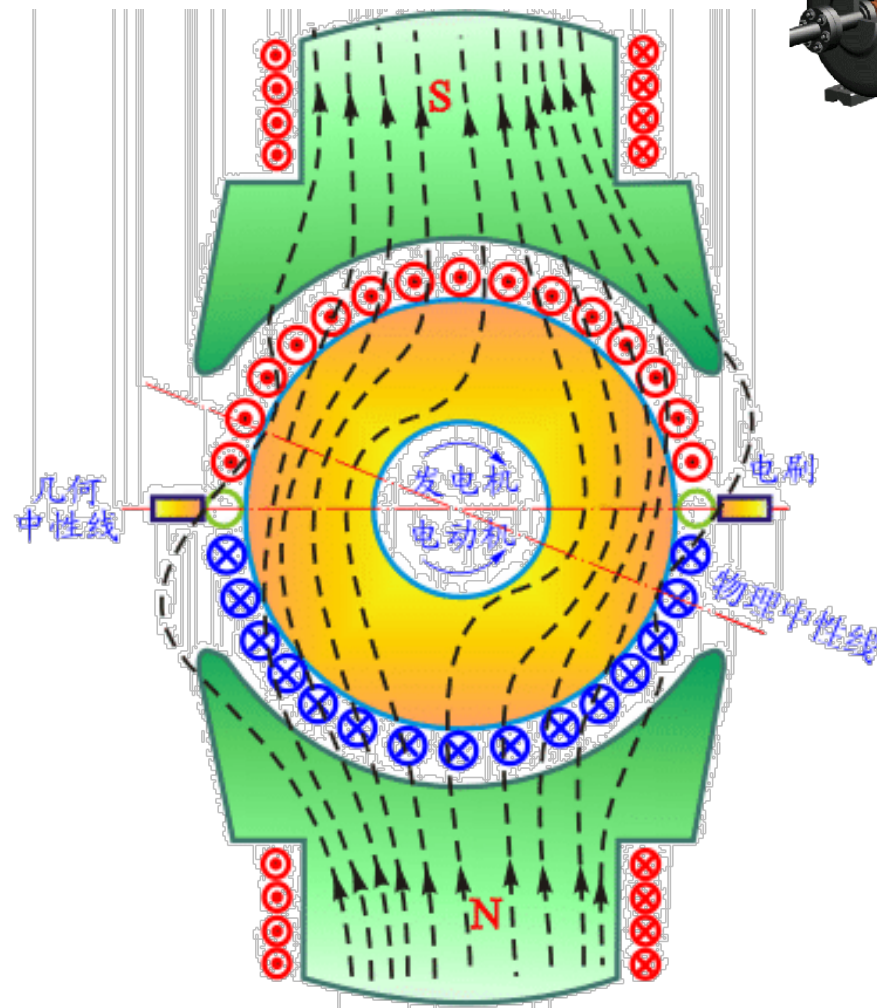
交轴电枢反应对气隙磁场的影响：

1. 使气隙磁场发生畸变
2. 使物理中心线偏移几何中心线一个角度（对发电机：顺着旋转方向）
3. 磁路未饱和时，每极磁通 Φ 不变
4. 如考虑磁路饱和的影响，则交轴电枢反应有去磁作用





电刷在几何中性线上的电枢磁场



交轴电枢反应

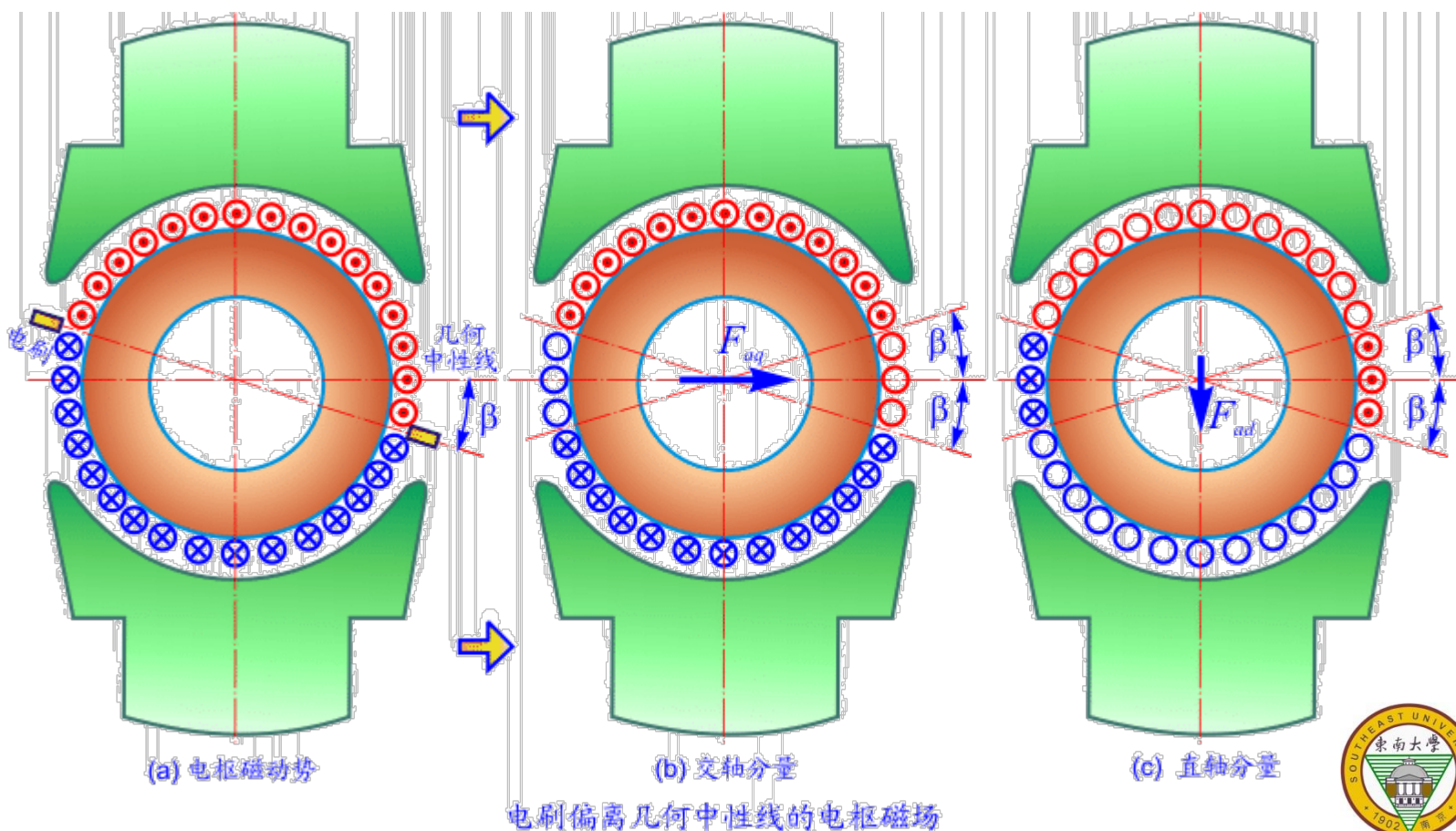
5、交轴电枢反应使极面下的磁通密度分布不均匀

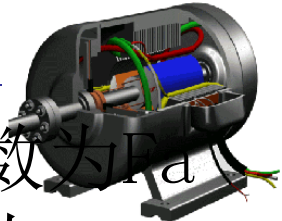




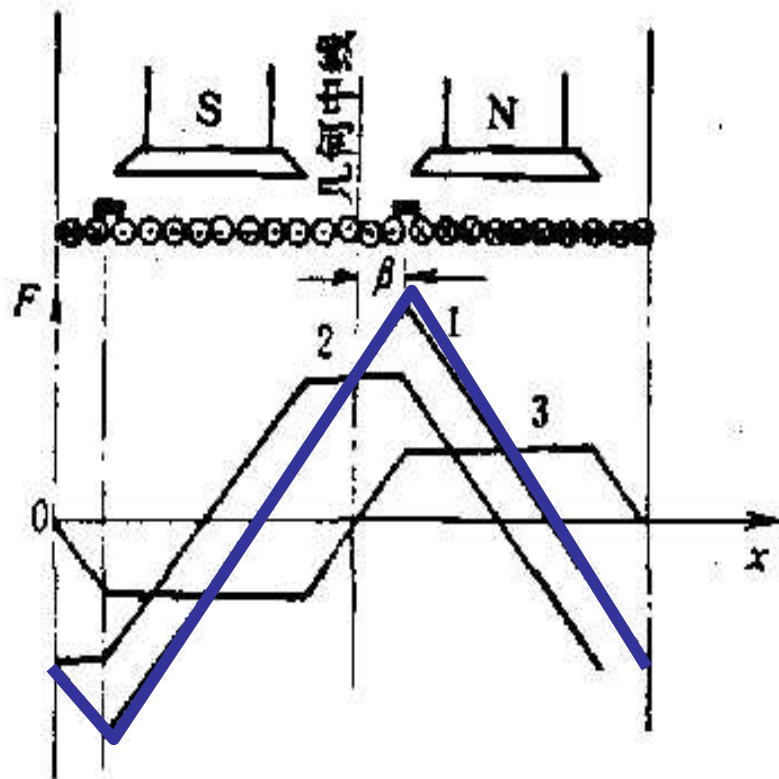
直轴电枢反应

- 如电刷顺着发电机的旋转方向或逆着电动机的旋转方向移过一个角度 β ，则电枢电流的分布随之改变，电枢磁势的轴线也随着电刷移动。





简单分析



- 设电枢磁势的每极安匝数为 F_a
- 则直轴电枢磁势的幅值为

$$F_{ad} = F_a \frac{2\beta}{\pi} = A\tau \frac{\beta}{\pi}$$

- 交轴电枢磁势的幅值为

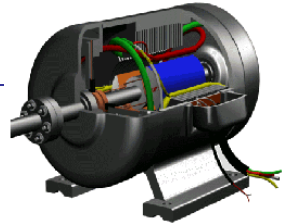
$$F_{aq} = F_a \frac{\pi - 2\beta}{\pi} = A\tau \left(\frac{1}{2} - \frac{\beta}{\pi} \right)$$

交轴电枢磁势的去磁作用，用等效直轴去磁安匝 F_{aqd} 表示，它与磁路的饱和程度有关，可近似与电枢电流成正比

- 有效的励磁磁势为

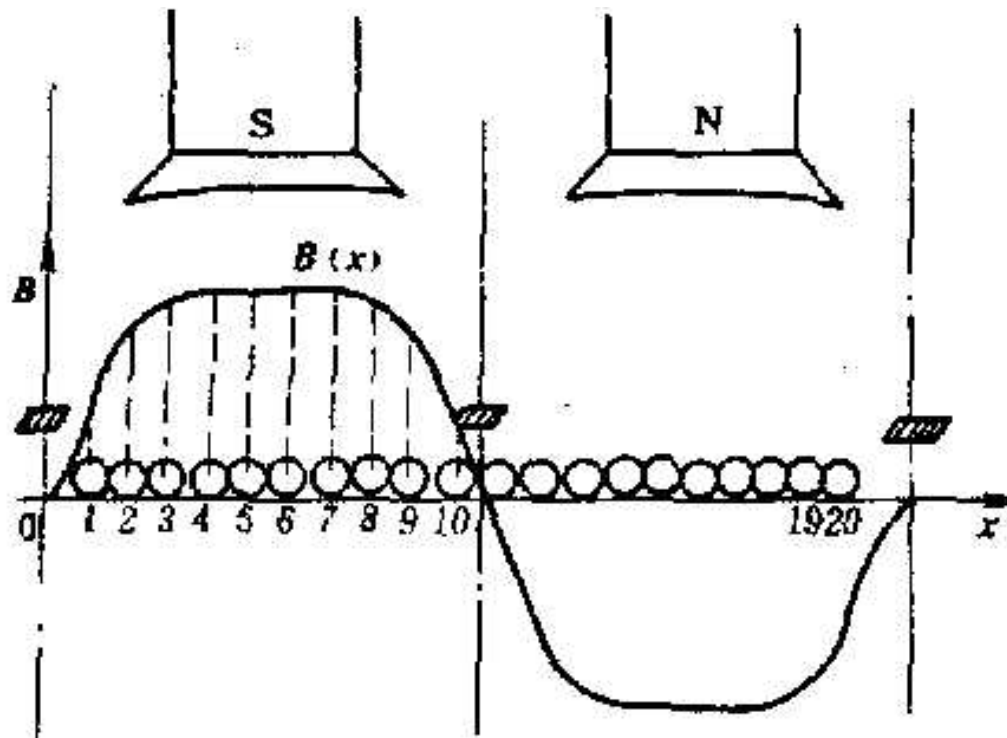
$$F_f = F_{f0} - F_{ad} - F_{aqd}$$





电枢绕组的感应电势

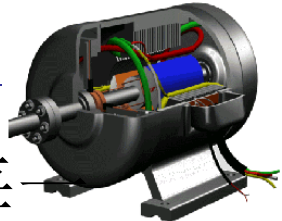
- 电枢绕组的感应电势——电机正、负电刷之间的电势，即每一并联支路的电势。



位于电刷之间固定位置的各个导体的感应电势之和

假设电枢导体是连续均匀分布的，则电势为恒定的直流电势





- 设电枢总导体数为 N ，有 $2a$ 条并联支路，则每一支路中的串联导体为 $N / 2a$
- 电刷间的感应电势为每一支路中的串联导体的感应电势之和

$$E_a = \sum_{j=1}^{\frac{N}{2a}} e_j = \frac{N}{2a} e_{av}$$

假设平均磁密为 B_{av} ,

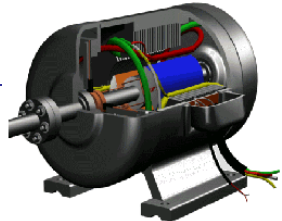
导体有效长度为 l

运动线速度为 v , $v = \pi D_a \frac{n}{60} = 2p\tau \frac{n}{60}$

则 $e_{av} = B_{av}lv = B_{av}l \cdot 2p\tau \frac{n}{60} = 2p\Phi \frac{n}{60}$

$$E_a = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = C_e n \Phi$$





$$E_a = C_e n \phi$$

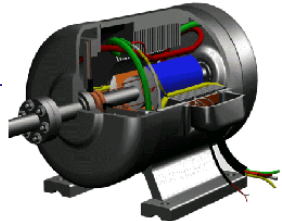
直流电机的感应电势与每极磁通量及转速有关。

如将每极磁通量保持不变，直流电机的感应电势将和转速成正比。

如将转速保持不变，直流电机的感应电势将和每极磁通量成正比。

电刷间的感应电势仅和极面下的总磁通量有关，而和极面下磁通密度的分布情况无关





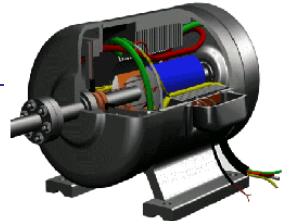
■ 电刷在交轴，如果移动电刷位置，则支路中一部分导体的感应电势将因方向相反而互相抵消，导致电刷间电势 E_a 的减小。

$$E_a = C_e \Phi n \quad \Phi \text{ 为相邻两电刷所连接的} \\ \text{导体间包括的每极有效磁通}$$

■ 使用负载时的每极磁通，得负载时电刷感应电势 E_a 。

■ 当负载时，由于电枢回路的电阻电压降，直流发电机电刷间的端电压 U 比负载时的电刷电势 E_a 小





直流发电机的平衡方程式

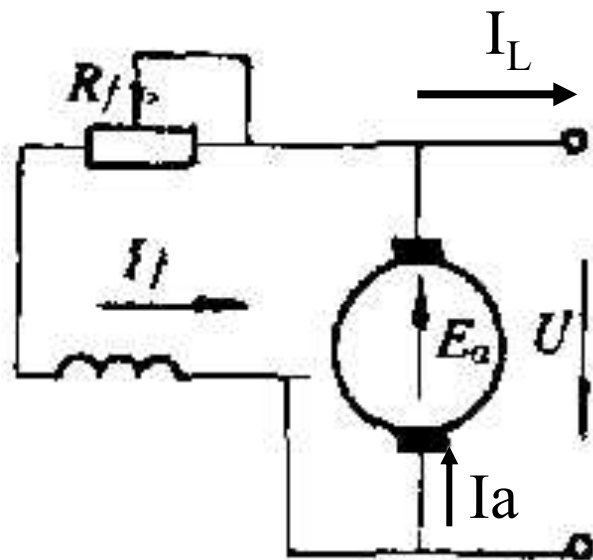
•电压平衡式

$$I_a = I_L + I_f$$

$$E_a = U + I_a r_a + 2\Delta U$$

ΔU ——每一电刷的接触电压降

电刷接触电阻随电流的增大而减小，通常假定为常数，当用石墨电刷或碳石墨电刷时，取为1V

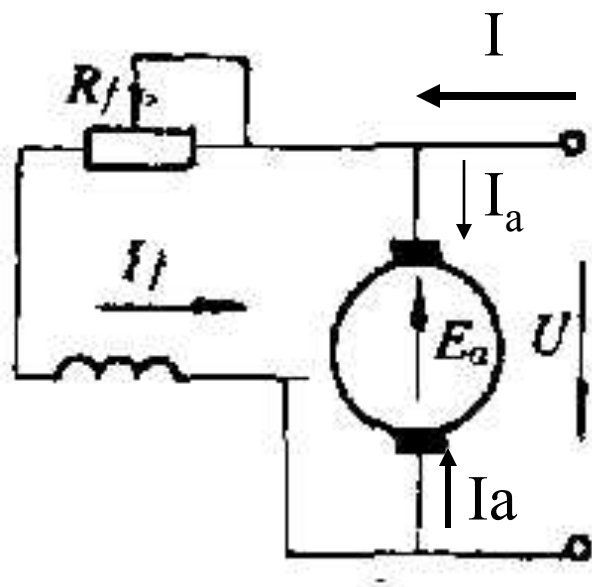


并励发电机





直流电动机的平衡方程式



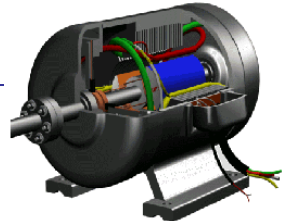
电压平衡式

$$E_a = U - I_a r_a - 2\Delta U$$

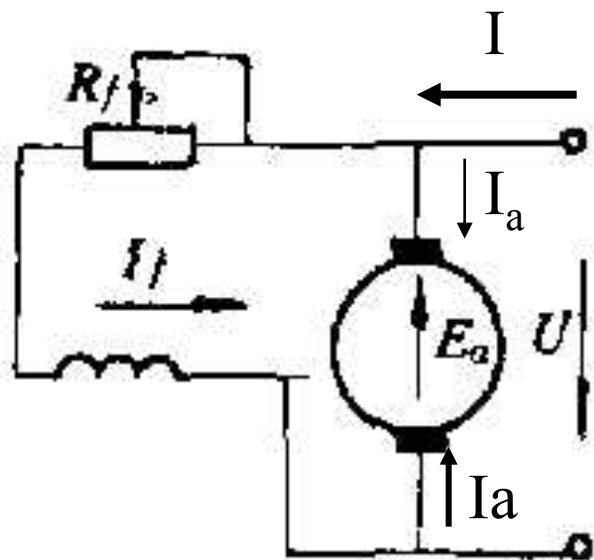
电流平衡式
(并励时)

$$I = I_a + I_f$$





直流电动机的平衡方程式



并励回路损耗
电枢回路铜损
电刷接触电损耗
机械损耗
铁损耗
杂散损耗

功率平衡式（并励时）

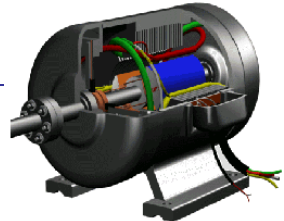
输入电功率 $P_1 = UI = UI_a + UI_f = UI_a + p_f$

电磁功率
$$P_M = E_a I_a = UI_a - (I_a^2 \sum r_a + 2I_a \Delta U)$$

$$= UI_a - p_a - p_b$$

输出机械功率 $P_2 = P_M - (p_{mec} + p_{Fe} + p_{\Delta})$





电枢绕组的电磁转矩

- 设流过电刷的电流为 I_a
- 电枢导体中的电流是 $I_a / 2a$
- 设电枢直径为 D_a ，电枢导体的有效长度为 l

$$F_j = B_j l \frac{I_a}{2a}$$

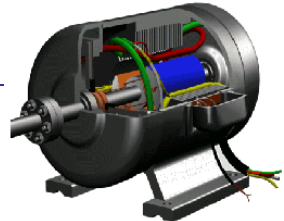
$$T_j = F_j \frac{D_a}{2} = B_j l \frac{I_a}{2a} \frac{D_a}{2}$$

$$T_{av} = B_{av} l \frac{I_a}{2a} \frac{D_a}{2} = B_{av} l \frac{I_a}{2a} \frac{2p\tau}{2\pi} = \frac{p}{2\pi a} \Phi I_a$$

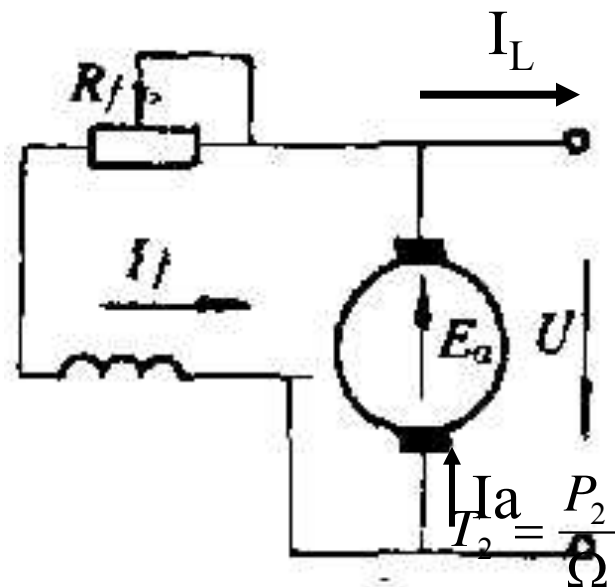
- 电枢总的电磁转矩

$$T = \sum_{j=1}^N T_j = w T_{av} = C_T \Phi I_a$$





直流发电机的转矩平衡



并励发电机

直流电动机转矩平衡式

转矩平衡式 $T_1 = T + T_0$

输入机械转矩 $T_1 = \frac{P_1}{\Omega}$

电磁转矩

$$T = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{E_a I_a}{\Omega}$$

$$= \frac{\frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi}{2\pi n} I_a = C_T \Phi I_a$$

$$T_0 = \frac{p_{mec} + p_{Fe} + p_{\Delta}}{\Omega}$$

$$T = T_2 + T_0 \quad T = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{E_a I_a}{\Omega} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a$$

